

Dielektrische Verluste durch Ionenleitung im geschichteten Dielektrikum

Von Wolfgang Held und Kurt Wenzel, Berlin*)

DK 621.315.619.017.143

Die Verluste in einem getränktem geschichteten Dielektrikum entstehen durch die Bewegung von Ladungsträgern und Drehung von Dipolen. Ein Teil dieser Verluste entsteht durch Bewegung von Ionen, insbesondere in den Tränkmittelschichten. Diese verursachen einen spannungsabhängigen Verlauf des Verlustfaktors und eine von der Sinusform um so mehr abweichende Kurvenform des Verluststromes, je höher die Feldstärke im Dielektrikum ist. Dieses Verhalten wurde erstmals von C. G. Garton [1] durch theoretische Überlegungen und unabhängig davon von F. Liebscher [2 und 7] durch eingehende experimentelle Untersuchungen, besonders durch Ionenstromoszillogramme geklärt. In der folgenden Arbeit werden Gleichungen aufgestellt, die dem Praktiker den funktionellen Zusammenhang der für diese Verluste maßgebenden Einflußgrößen geben.

Allgemeines

Die Untersuchungen in [1, 2 und 7] und in vorliegender Arbeit wurden am Kondensatordielektrikum — bestehend aus Papier und Chlordiphenyl — durchgeführt, gelten aber analog auch für jedes andere geschichtete Dielektrikum (z. B. Kabel).

Am besten versteht man die Vorgänge der Ionenleitung an Hand der Ionenstrom-Oszillogramme (Bild 1). Im allgemeinen besteht ein Kondensatordielektrikum aus mehreren Schichten eines festen Isolierstoffes, zwischen denen sich Flüssigkeitsspalte mit einer mittleren Dicke von 2 bis 5 μm befinden. Darin werden die Ionen, die auch in sehr gut gereinigten Tränkmitteln und sorgfältig ausgesuchten Werkstoffen des Kondensators immer vorhanden sind, unter dem Einfluß der Wechselspannung hin und her bewegt. Bei

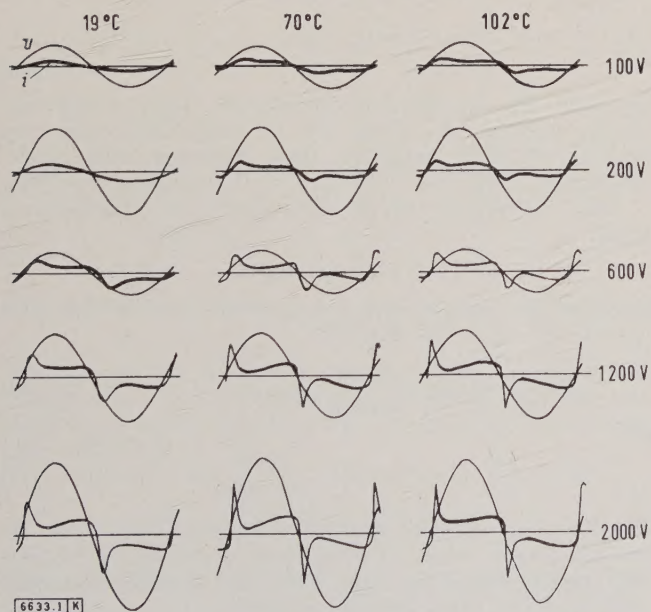


Bild 1. Ionenstrom i in einem Leistungskondensator mit stark gealtertem Mineralöl, abhängig von der Temperatur t und der angelegten Spannung u .

kleiner Feldstärke sind die Laufwege der Ionen noch so klein, daß sie, ohne an den festen Isolierstoffen anzustoßen, ungehindert hin und her laufen. Steigert man die Feldstärke, so werden die Laufwege der Ionen immer größer.

*) Dr.-Ing. W. Held und Dipl.-Ing. K. Wenzel sind Mitarbeiter der Siemens-Schuckertwerke in Berlin.

Die Ionen stoßen schließlich vor Ablauf einer halben Periode an die Begrenzungen der Flüssigkeitsspalte an, der Ionenstrom geht bis zur Umkehr der Spannung auf Null zurück. Dadurch bilden sich die „Ionenstromspitzen“, die Bild 1 deutlich erkennen läßt. Ein Ionenstrom fließt während eines um so kürzeren Zeitabschnittes in jeder halben Periode, je

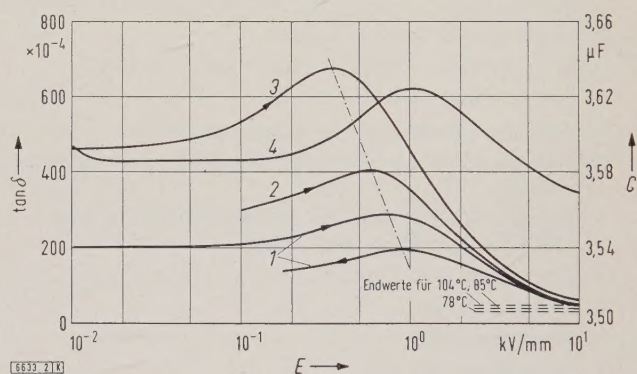


Bild 2. Verlustfaktor $\tan \delta$ und Kapazität C , abhängig von der Feldstärke E , in einem mit Clophen A 50 getränkten Kondensatorwickel aus Papier (die Kapazitätsänderung durch Ionenleitungsverluste soll in einer späteren Arbeit näher untersucht werden).

- 1 Kurve des Verlustfaktors $\tan \delta$ bei 78 °C
- 2 Kurve des Verlustfaktors $\tan \delta$ bei 85 °C
- 3 Kurve des Verlustfaktors $\tan \delta$ bei 104 °C
- 4 Kapazitätsverlauf bei 104 °C

höher die Feldstärke ist. Entsprechend tragen die Ionen relativ immer weniger zu den dielektrischen Verlusten bei, da sie in der Zeit zwischen dem Anstoßen an den Begrenzungen und der Feldumkehr zu Beginn der nächsten halben Periode in Ruhe sind und folglich keine Verluste erzeugen. Dadurch sinkt der Verlustfaktor durch Ionenleitung $\tan \delta_i$ mit der Spannung.

Anlaß zur vorliegenden Arbeit gaben zahlreiche Messungen des Verlustfaktors $\tan \delta$, abhängig von der Spannung und Temperatur an Leistungskondensatoren im Neuzustand und nach längerer Betriebszeit, und besonders die bereits 1943 von F. Liebscher und H. Finckbein ausgeführten sehr genauen Messungen nach Bild 2. Das Ziel bestand darin, den Einfluß aller maßgeblichen Parameter — Zahl und Größe der Ionen im Tränkmittel, Viskosität, geometrische Abmessungen des Dielektrikums, Dielektrizitätskonstante, Feldstärke, Frequenz — auf den Verlauf des Verlustfaktors so in die Gleichungen einzusetzen, daß die Ergebnisse qualitativ und quantitativ mit der Erfahrung im Einklang

stehen. Dazu werden, ähnlich wie bei Garton, zunächst die Bewegungsgleichungen aufgestellt und integriert. Durch geeignete Reihenentwicklungen wird es möglich, die gesuchten Zusammenhänge zwischen den genannten Einflußgrößen und Verlustfaktor, Ionengeschwindigkeit, Ionenstrom, Laufzeit durch den Spalt, Höhe der Ionenstromspitze und Energie, die zum Transport eines Ionenpaares durch den Flüssigkeitsspalt erforderlich ist, in geschlossener Form für alle Feldstärken anzugeben. Die Gleichungen müssen auch für die sehr dünnen Flüssigkeitsspalte in fertigen Leistungskondensatoren der Papier-Folienbauweise gültig sein.

Notwendig ist es dazu, den Einfluß der von Ionen-transportverlusten praktisch freien festen Isolierstoffe im Dielektrikum zu berücksichtigen. Es wird gezeigt, daß bei großen Feldstärken im Betrieb das Papier außerdem einen großen Einfluß auf die Zahl der frei beweglichen Ionen hat. Die angegebenen Gleichungen lassen ferner erkennen, daß Schlüsse auf die Ionenstromverluste eines fertigen Kondensators aus den Tränkmittelmessungen in einem Meßkondensator nur bedingt gezogen werden können.

Ionenbewegung im homogenen Feld

In den Gleichungen haben die nachfolgenden Formelzeichen folgende Bedeutung:

- η dynamische Zähigkeit des Tränkmittels,
- $E(t)$ Augenblickswert der elektrischen Feldstärke,
- E Effektivwert der elektrischen Feldstärke,
- \hat{E} Scheitelwert der elektrischen Feldstärke,
- \hat{E}' Scheitelwert der elektrischen Feldstärke, bei der die Ionen gerade den ganzen Flüssigkeitsspalt durchlaufen,
- d Dicke des Flüssigkeitsspaltes,
- ξ Weg des Ions während einer halben Periode,
- R Ionenradius,
- N Zahl der Ionenpaare je Volumeneinheit,
- Z Anzahl der dissoziierbaren Moleküle je Volumeneinheit,
- τ Zeit, innerhalb derer das Ion durch den ganzen Flüssigkeitsspalt bewegt wird,
- x der in der Zeit t vom Ion zurückgelegte Weg,
- T Periodendauer,
- ω Kreisfrequenz,
- n Wertigkeit des Ions,
- v Wanderungsgeschwindigkeit des Ions,
- m Ionenmasse,
- e Elementarladung,
- ϵ_r relative Dielektrizitätskonstante,
- $\epsilon_0 = \frac{10^{-11}}{36\pi} \frac{\text{As}}{\text{Vcm}}$ Dielektrizitätskonstante des leeren Raumes.

Auf ein n -wertiges Ion im sinusförmigen Wechselfeld $E(t) = \hat{E} \sin \omega t$ wirkt die zeitliche veränderliche Kraft

$$F(t) = n e \hat{E} \sin \omega t. \quad (1)$$

Gebremst wird das Ion nach dem Stokesschen Gesetz durch die Reibungskraft F_r :

$$F_r = 6 \pi \eta R v. \quad (2)$$

Das Stokessche Gesetz gilt streng nur für makroskopische Kugeln, mit guter Näherung aber auch noch für Ionen in allen Flüssigkeiten außer Wasser [3]. Nimmt man an, daß auf jedes einzelne Ion nur die treibende Kraft F und die Bremskraft F_r wirkt, dann gilt mit Gl. (1) und (2)

$$m \dot{v} = n e \hat{E} \sin \omega t - 6 \pi \eta R v. \quad (3)$$

Es werden also etwaige Adhäsionskräfte zu Beginn der Bewegung, besonders bei kleinen Feldstärken, und gegen-

seitige Abstoßung (Raumladungseffekte) bei großen Iondichten nicht berücksichtigt. Mit den Abkürzungen

$$a = \frac{6 \pi \eta R}{m} \quad (4)$$

und

$$b = \frac{n e \hat{E}}{m} \quad (5)$$

ergibt sich die allgemeine Lösung der Gl. (3) zu

$$v(t) = C_1 e^{-at} + (a \sin \omega t - \omega \cos \omega t) b (a^2 + \omega^2)^{-1}. \quad (6a)$$

Man muß nun zwei Fälle unterscheiden:

1. Die Ionen stoßen während einer halben Periodendauer an die Begrenzungsfläche des Flüssigkeitsspaltes nicht an. Sie sind also frei beweglich.
2. Die Ionen bewegen sich so schnell, daß sie innerhalb einer halben Periodendauer an eine Begrenzungsfläche des Flüssigkeitsspaltes anstoßen und dann für den Rest der halben Periode in Ruhe sind.

Im Fall 1 verschwindet sehr kurz nach dem Einschalten der erste Summand in Gl. (6a), der den Einschwingvorgang wiedergibt, und man braucht nur den eingeschwungenen Zustand zu betrachten. Damit geht Gl. (6a) über in

$$v(t) = (a \sin \omega t - \omega \cos \omega t) b (a^2 + \omega^2)^{-1}. \quad (6b)$$

Im Fall 2 bleibt Gl. (6a) voll erhalten, weil die Ionen nach jedem Nulldurchgang der Spannung ihre Bewegung mit $v = 0$ beginnen und der Einschwingvorgang nach jeder halben Periode erneut auftritt.

Mit der Anfangsbedingung $t = 0$ und $v = 0$ ergibt sich für den Fall 2 entsprechend Gl. (6a) die Ionengeschwindigkeit zu

$$v(t) = (\omega e^{-at} + a \sin \omega t - \omega \cos \omega t) b (a^2 + \omega^2)^{-1}. \quad (7)$$

Nach Integration von Gl. (6b) und (7) ist der in der Zeit t zurückgelegte Weg x eines Ions, wenn noch die Anfangsbedingungen $t = 0$ und $x = 0$ eingesetzt werden, für den

Fall 1:

$$x(t) = (1 - \cos \omega t - \omega/a \cdot \sin \omega t) b a \omega^{-1} (a^2 + \omega^2)^{-1} \quad (8a)$$

und

Fall 2:

$$x(t) = [1 - (\omega^2 e^{-at} + a^2 \cos \omega t + a \omega \sin \omega t) (a^2 + \omega^2)^{-1}] b (a \omega)^{-1}. \quad (8b)$$

Die Zeit, die ein Ion zum Durchlaufen eines bestimmten Weges benötigt, ist durch die inversen Gleichungen zu Gl. (8a) und (8b) festgelegt. Diese Funktion kann in geschlossener Form nur für den Fall 1 angegeben werden.

Eine Abschätzung der Größenordnung der Konstanten a ergibt

$$a = 10^{13} \text{ bis } 10^{18} \text{ s}^{-1},$$

somit ist also immer noch $a \gg \omega$. Damit vereinfachen sich Gl. (6b), (7), (8a) und (8b) zu

$$v(t) = \frac{b}{a} \sin \omega t = \frac{n e \hat{E}}{6 \pi \eta R} \sin \omega t \quad (9)$$

und

$$x(t) = \frac{b}{a \omega} (1 - \cos \omega t) = \frac{n e \hat{E}}{6 \pi \eta R \omega} (1 - \cos \omega t). \quad (10)$$

Für Fall 1 und 2 gelten demnach dieselben Gleichungen. Da das Ion wegen seiner kleinen Masse praktisch trägheitslos dem elektrischen Feld folgt, kann der Einschwingvorgang auch im Fall 2 vernachlässigt werden.

Aus Gl. (10) folgt für $t = T/2$ der vom Ion während einer Halbwelle zurückgelegte Weg zu

$$\xi/d = 2 b/(a \omega d). \quad (11)$$

Zur Abkürzung wird die Kenngröße α eingeführt, die definiert ist durch

$$\frac{2 b}{a \omega d} = \frac{n e \hat{E}}{3 \pi \eta R \omega d} = \alpha. \quad (12)$$

Wenn $\alpha = 1$ ist, durchläuft das Ion gerade den ganzen Flüssigkeitsspalt ($\xi = d$). Ist $\alpha < 1$, also $\xi < d$, ist das Ion frei beweglich (Fall 1), während es bei $\alpha > 1$ vor Ablauf einer halben Periodendauer an der anderen Wand anstößt und nur während der Zeit τ , die gleich

$$\tau = \frac{2}{\omega} \arcsin \sqrt{\frac{1}{\alpha}} < \frac{T}{2} \quad (13)$$

ist, in Bewegung ist (Fall 2).

Die Kenngröße α ist der Feldstärke \hat{E} proportional. Aus Gl. (12) ergibt sich diejenige Feldstärke, bei der das Ion gerade den Flüssigkeitsspalt durchläuft, wobei $\alpha = 1$ ist, zu

$$\hat{E}' = 3 \pi \eta R \omega d / n e. \quad (14)$$

Verlustfaktor $\tan \delta_i$ durch Ionenleitung

Mit den Gleichungen der Ionenbewegung kann der durch Ionenleitung verursachte Verlustfaktor $\tan \delta_i$ berechnet werden. Zunächst wird nur der Bereich $\alpha > 1$ betrachtet.

Jedes Ion trägt zu den dielektrischen Verlusten im Tränkmittel bei. Auf seinem Weg von der einen zur anderen Begrenzung des Flüssigkeitsspaltes wird an ihm die Arbeit

$$W' = \int_0^d F dx = n e \hat{E} \int_0^{\tau} \sin \omega t v dt \quad (15)$$

geleistet. Unter der Voraussetzung, daß die Flüssigkeitsspalte d im Dielektrikum gleichmäßig verteilt sind und daß je Volumeneinheit die gleiche Zahl N von positiven und

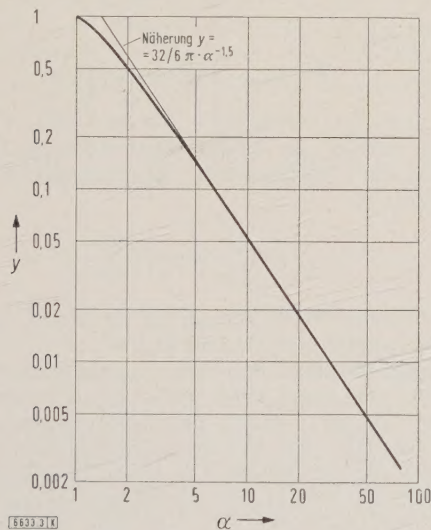


Bild 3. Hilfsfunktion $y(\alpha)$ zur Berechnung der Verluste durch Ionenleitung je Ionenpaar.

negativen Ionen mit gleicher Beweglichkeit vorhanden ist, beträgt die auf 1 cm^2 Elektrodenoberfläche und den Abstand d bezogene Arbeit W des IONENTPORTES während einer Halbwelle

$$W = 2 N n e \hat{E} d \int_0^{\tau} v \sin \omega t dt. \quad (16)$$

Teilt man Gl. (16) durch $T/2 = \pi/\omega$, so ergibt sich die Verlustleistung je Flächeneinheit zu

$$P_v = \frac{2 N n e \hat{E} d \omega}{\pi} \int_0^{\tau} v \sin \omega t dt. \quad (17)$$

Die auf die gleiche Elektrodenoberfläche bezogene Blindleistung beträgt

$$P_b = \epsilon_r \epsilon_0 \omega d E^2. \quad (18)$$

Der Verlustfaktor durch Ionenleitung ergibt sich entsprechend Gl. (17) und (18), wenn für v noch Gl. (9) eingesetzt wird, zu

$$\frac{\tan \delta_i}{N} = \frac{2 (n e)^2}{3 \pi^2 \epsilon_r \epsilon_0 \eta R} \int_0^{\tau} \sin^2 \omega t dt. \quad (19)$$

Integriert man diese Gleichung, so ergibt sich mit Gl. (13) im Bereich $\alpha > 1$ für

$$\frac{\tan \delta_i}{N} = \frac{(n e)^2}{3 \pi \epsilon_r \epsilon_0 \eta \omega R} \cdot y(\alpha), \quad (20)$$

mit der Hilfsfunktion

$$y(\alpha) = [4 \arcsin \sqrt{1/\alpha} - \sin(4 \arcsin \sqrt{1/\alpha})] / 2 \pi. \quad (21)$$

Diese Funktion ist in Bild 3 über α aufgetragen. Sie kann für $\alpha \geq 1,5$ durch Reihenentwicklung vereinfacht werden.

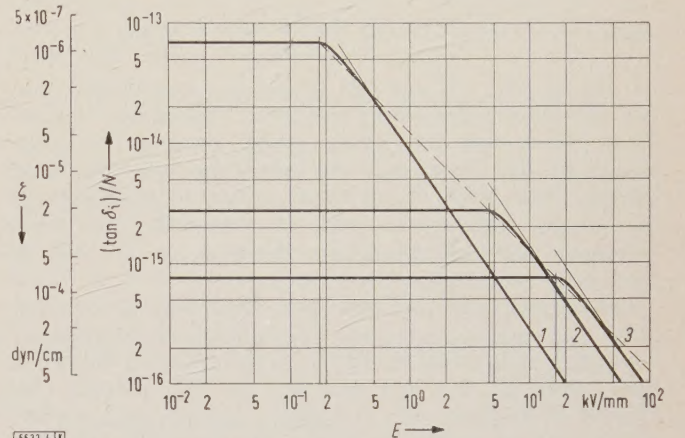


Bild 4. Verlustfaktor durch Ionenleitung je Ionenpaar, abhängig von der Feldstärke E bzw. E' und dem Wert ζ , für eine Dicke des Flüssigkeitsspaltes $d = 5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$ und eine Ionenwertigkeit $n = 1$.
1 Isolierflüssigkeit Clophen A 30 bei 100°C und 50 Hz
2 Isolierflüssigkeit Clophen A 50 bei 50°C und 50 Hz
3 Isolierflüssigkeit Clophen A 30 bei 70°C und 2000 Hz

Hierbei erhält man

$$y(\alpha) \approx \frac{16}{3 \pi} \alpha^{-3/2} (1 - 0,3 \alpha^{-1}) \text{ für } \alpha \geq 1,5 \quad (22)$$

und

$$y(\alpha) \approx \frac{16}{3 \pi} \alpha^{-3/2} \text{ für } \alpha \geq 10. \quad (23)$$

Damit nimmt Gl. (20) die Form an

$$(\tan \delta_i)/N = 16 \sqrt{n e R \omega \eta d^3} \cdot (\epsilon_r \epsilon_0 \sqrt{3 \pi \hat{E}^3})^{-1}. \quad (24)$$

Für den Bereich $\alpha \leq 1$ ist von 0 bis $T/2$ zu integrieren, so daß man erhält

$$(\tan \delta_i)/N = (n e)^2 (3 \pi \epsilon_r \epsilon_0 R \omega \eta)^{-1}. \quad (25)$$

Damit stimmt Gl. (25) mit Gl. (20) für $\alpha = 1$ überein.

Aus Gl. (18), (24) und (25) ergibt sich die zum Transport eines Ionenpaares während einer Halbwelle aufzubringende Energie zu:

$$P_v = P_b/N \cdot \tan \delta_i = (n e)^2 d \hat{E}^2 \cdot (6 \pi \eta R)^{-1} \text{ für } \alpha \leq 1 \quad (26)$$

und

$$P_v = 8 (n e R \eta \hat{E})^{1/2} \cdot \omega^{3/2} \cdot d^{5/2} \cdot (3 \pi)^{-1/2} \text{ für } \alpha > 1. \quad (27)$$

Der Verlauf der Funktion $\tan \delta_i = f(\hat{E})$ für ein Ionenpaar ist durch die Gl. (25) und (20) bzw. (24) vollständig bestimmt und in Bild 4 für verschiedene Werte des Parameters $\zeta = \omega \eta R$ über der Feldstärke E aufgetragen. Aus Gl. (14) und (25) folgt noch für die charakteristische Größe \hat{E}' , bei

der die Ionen den Flüssigkeitsspalt innerhalb der Zeit $T/2$ gerade durchlaufen,

$$\xi = \frac{ne}{3\pi d} \hat{E}' \quad (28)$$

und

$$\frac{\tan \delta_i}{N} = \frac{ned}{\epsilon_r \epsilon_0} \cdot \frac{1}{\hat{E}'}. \quad (29)$$

Im doppellogarithmischen Maßstab ergibt sich für Gl. (28) und (29) eine unter 45° geneigte Gerade. Auch der Verlauf von $(\tan \delta_i)/N = f(E)$ nähert sich sehr bald einer Geraden mit der Neigung $-3/2$.

Somit ergibt sich also für ein Ionenpaar der Verlustfaktor

$$(\tan \delta_i)/N \sim 1/\xi \quad \text{für } \alpha \leq 1, \quad (30)$$

$$\hat{E}' \sim \xi d \quad \text{für } \alpha = 1 \quad (31)$$

$$\text{und} \quad (\tan \delta_i)/N \sim \xi^{1/2} \cdot d^{3/2} \cdot \hat{E}'^{-3/2}, \quad (32)$$

wobei

$$\alpha = \frac{ne\hat{E}}{3\pi\zeta d} \quad \text{und} \quad \zeta = \omega \eta R$$

ist. Die Gl. (14), (24) und (25) geben den tatsächlichen Verlauf des durch Ionenleitung bedingten zusätzlichen Verlustfaktors $\tan \delta_i$ noch nicht genau wieder, weil sich die Ionenzahl N mit der Temperatur und Feldstärke ändert. In Wirklichkeit steigt $\tan \delta_i$ bis zu einem ausgeprägten Maximum, das an der Stelle $\alpha = 1$ liegt, an, und fällt dann etwas langsamer als nach Gl. (24) ab. Die Funktion $N = f(\vartheta, \hat{E})$ wird später näherungsweise berechnet.

Die Gl. (30), (31) und (32) vermitteln einen guten Überblick über die experimentell beobachteten Erscheinungen, wenn man stets beachtet, daß nur ein Ionenpaar betrachtet wird. Nach Gl. (30) und (32) ist der Verlustfaktor bei kleinen Feldstärken um so kleiner und bei großen Feldstärken um so größer, je größer die Frequenz, Zähigkeit und der Ionenradius sind. Das bedeutet:

1. Bei Frequenzen von 500 bis 10 000 Hz gilt wegen Gl. (12) stets $\alpha < 1$. Die Ionen erreichen also nie die Begrenzung, da $T/2$ kleiner als bei 50 Hz ist. Wegen $(\tan \delta_i)/N \sim 1/\xi$ ist $\tan \delta_i$ etwa 10- bis 200-mal kleiner als bei 50 Hz, also praktisch Null. Bei Mittelfrequenz kann man deshalb diesen Verlustanteil vernachlässigen.

2. Messungen des $\tan \delta$ an Tränkmitteln werden üblicherweise bei rd. 1 kV/mm durchgeführt, d. h. nach Gl. (12) im Bereich $\alpha < 1$, während normale Leistungskondensatoren im Bereich $\alpha > 1$ betrieben werden. Schlüsse auf die Ionenverluste des getränkten Kondensators können aus den Tränkmittelmessungen nur bedingt gezogen werden, weil die Größe $\zeta = \omega \eta R$ für $\alpha < 1$ im Nenner und für $\alpha > 1$ im Zähler steht. Der Einfluß der Ionengröße wirkt sich im falschen Sinne aus, d. h. große Ionen täuschen niedrige Tränkmittelverluste vor und wirken sich im getränkten Kondensator stark aus.

3. Bei annähernd gleicher Ionenzahl N verhalten sich dünnflüssige Tränkmittel hinsichtlich der Ionenverluste (siehe Bild 4, Kurven 1 und 2) bei Betriebsfeldstärke etwas günstiger als zähflüssige, da $\sqrt{\eta}$ in Gl. (24) im Zähler steht. Der Verlustfaktor $\tan \delta_i$ bei kleiner Feldstärke ist im Verhältnis $1/\eta$ größer [Gl. (25)] als bei zähflüssigen Tränkmitteln.

4. Der bekannte Anstieg des Verlustfaktors mit der Temperatur bei Öl- und Clophenkondensatoren ist bei Betriebsfeldstärke nur auf den Anstieg der Verluste im Papier zurückzuführen. Die Ionenverluste werden, da $\tan \delta_i$ proportional $\sqrt{\eta}$ ist, mit abnehmender Viskosität sogar kleiner, da die Ionenzahl, wie noch gezeigt wird, sich mit der Temperatur nur wenig ändert.

Gl. (31) gibt einen Hinweis auf die Vorgänge beim „Altern“ von Kondensatoren. Gelegentlich wird beobachtet, daß sich das Maximum von $\tan \delta$ zu höheren Feldstärken,

z. B. zum 0,5-fachen der Nennfeldstärke verschiebt. Aus Gl. (31) folgt, daß sich sehr große Ionenkomplexe gebildet haben müssen, da die Größen η und d sich praktisch nicht ändern. Die Verluste bei Nennfeldstärke müssen sich nicht notwendig vergrößern, da $\tan \delta_i$ nach Gl. (32) dem Produkt N/ξ proportional ist und N durch Bildung von Ionenkomplexen (Koagulation) sogar kleiner werden kann.

Ein anschauliches Bild über die Ionenbewegung in dünnen Flüssigkeitsschichten hat F. Liebscher [2] gegeben. Dieser Arbeit ist Bild 1 entnommen, das Verluststromoszillogramme eines stark gealterten Kondensators mit Mineralöl zeigt. Der Verluststrom ist bei kleiner Spannung zunächst sinusförmig ($\alpha < 1$), bei hoher Spannung bildet sich eine Ionenstromspitze ($\alpha > 1$), da die Ionen in immer kürzerer Zeit den Flüssigkeitsspalt durchlaufen und dann anstoßen. Bei höherer Temperatur, also kleinerer Viskosität, bildet sich die Ionenstromspitze schon bei entsprechend kleinerer Spannung aus. Dieses Verhalten wird durch die folgenden Gleichungen quantitativ beschrieben.

Solange das Ion nicht anstößt, gilt Gl. (9)

$$v = \frac{ne\hat{E}}{6\pi\eta R} \sin \omega t,$$

und für die Stromdichte i erhält man

$$i = 2neNv = \frac{(ne)^2 N}{3\pi\eta R} \hat{E} \sin \omega t. \quad (33)$$

Das Ion stößt für $\alpha > 1$ nach der Zeit $\tau < T/2$ an, es gilt daher Gl. (13)

$$\tau = \frac{2}{\omega} \arcsin \sqrt{\frac{1}{\alpha}}.$$

Für $\tau \ll T/2$ gilt

$$\tau \approx \frac{2}{\omega} \alpha^{-1/2} = \sqrt{\frac{12\pi R d}{ne\omega}} \sqrt{\frac{\eta}{\hat{E}}}. \quad (34)$$

Setzt man Gl. (34) in Gl. (33) ein, so ergibt sich für $t = \tau \ll T/2$ der Maximalwert der Ionenstromspitze je Flächeneinheit zu

$$\hat{i} = i_{\max} = \frac{2}{\sqrt{3\pi}} N(ne)^{3/2} \sqrt{\frac{\hat{E} d}{\zeta}} \quad (35)$$

qualitativ in guter Übereinstimmung mit Bild 1 und anderen Oszillogrammen aus [1] und [7].

F. Liebscher bestimmt aus Messungen an einem Clophenkondensator bei einer Feldstärke $E = 15$ kV/mm, einem Abstand $d \approx 2,5 \mu\text{m}$ und bei einer Temperatur $\vartheta = 82^\circ\text{C}$ (Bild 13 aus [7]) die mittlere Ionengeschwindigkeit zu $v \approx 1,2$ mm/s und die Zeit zu $\tau \approx 2,5$ ms. Die Feldstärke E' läßt sich nach [7], Bild 13, nur abschätzen. Rechnet man mit $\alpha \approx 19$ für eine Feldstärke $E = 15$ kV/mm, so liefern Gl. (34) die Zeit $\tau = 1,5$ ms und Gl. (9) für $t = \tau$ die Ionengeschwindigkeit zu $v \approx 1,7$ mm/s. Man kann den Wert α auch rechnerisch bestimmen, wenn man den Ionenradius $R \approx 19 \text{ \AA}$, die Spaltgröße $d \approx 2,5 \mu$ und die dynamische Zähigkeit des Tränkmittels mit $\eta = 10$ cP in Gl. (14) einsetzt, die somit für die Feldstärke $\hat{E}'/\sqrt{2} = E' = 0,73$ kV/mm liefert. Damit ergeben sich bei einer Feldstärke von 15 kV/mm die Werte $\alpha = 20,6$, $\tau \approx 1,4$ ms und $v \approx 1,8$ mm/s. Diese Werte stimmen mit den experimentell ermittelten gut überein.

Vergleich von Rechnung und Messung

Bild 4 zeigt den theoretisch ermittelten Verlauf des zusätzlichen Verlustfaktors je Ionenpaar $(\tan \delta_i)/N = f(E, \zeta)$, Bild 2 enthält $\tan \delta$ -Kurven, die an einem Versuchskondensator mit stark verunreinigtem Clophen A 50 gemessen wurden. Damit ein Vergleich möglich ist, müssen von den gemessenen $\tan \delta$ -Werten noch die konstanten Anteile der Papier- (Index P) und Dipolverluste (Index D) abgezogen werden. In Tafel 1 werden die Höchstwerte von $\tan \delta$ verglichen.

Tafel 1. Meßwerte des Verlustfaktors $\tan \delta$.

Temperatur °C	$\tan \delta_{\max}$	$\tan \delta_{P+D}$	$\tan \delta_{i \max}$	η cP	$\hat{E}'/\sqrt{2}$ kV/mm
104	0,0668	0,0045	0,0623	5,5	0,35
85	0,0393	0,0036	0,0362	9,6	0,60
78	0,0285	0,0028	0,0257	12,0	0,75

Für die Höchstwerte von $\tan \delta$ gilt $\alpha = 1$. Nach Gl. (14) muß die zugehörige Feldstärke \hat{E}' der jeweiligen dynamischen Zähigkeit η des Tränkmittels proportional sein, wie die nachstehende Rechnung zeigt, wobei die Zahlenwerte im Index die Temperatur in Grad Celsius angeben:

$$\frac{E'_{104}}{E'_{85}} = \frac{0,35 \text{ kV/mm}}{0,60 \text{ kV/mm}} = 0,58 \quad \text{bzw.} \quad \frac{\eta_{103}}{\eta_{85}} = \frac{5,5 \text{ cP}}{9,6 \text{ cP}} = 0,57$$

und

$$\frac{E'_{104}}{E'_{78}} = \frac{0,35 \text{ kV/mm}}{0,75 \text{ kV/mm}} = 0,46 \quad \text{bzw.} \quad \frac{\eta_{104}}{\eta_{78}} = \frac{5,5 \text{ cP}}{12,0 \text{ cP}} = 0,46.$$

Die experimentell bestimmten Höchstwerte liegen also genau an den durch die Theorie berechneten Stellen. Der übrige Verlauf der gemessenen Kurven weicht von den je Ionenpaar berechneten Kurven $(\tan \delta_i)/N = f(\hat{E}, \zeta)$ ab, weil

1. $\tan \delta$ nicht bis zur Feldstärke $\hat{E} = \hat{E}'$ konstant ist, sondern zunimmt, da die Ionenzahl N mit der Feldstärke zunimmt,
2. $\tan \delta$ für $\hat{E} > \hat{E}'$ langsamer als mit der Potenz $\hat{E}^{-3/2}$ sinkt, da die Ionenzahl N offenbar weiterhin mit der Feldstärke zunimmt. Dadurch schneiden sich die $\tan \delta$ -Kurven für verschiedene Temperaturen und damit auch für verschiedene Zähigkeiten nicht mehr (Bild 2 und 4).

Aus Gl. (14) kann auf die Ionengröße geschlossen werden, wenn man mit einwertigen Ionen ($n = 1$) und einer Spaltdicke $d \approx 2,5$ bis $5 \mu\text{m}$ [2] rechnet. Der Ionenhalbmesser ist somit

$$R = \frac{n e \hat{E}'}{3 \pi \eta \omega d} = 9,5 \text{ bis } 19 \cdot 10^{-8} \text{ cm.}$$

Daraus kann man schließen, daß es sich nicht um freie H^+ , Na^+ , OH^- und andere kleine Ionen handelt, sondern um große Molekülonen, z.B. Clophenmoleküle mit angelagerten kleinen Ionen (H^+ und OH^- aus dem Restwasser im Papier, eventuell auch Na^+ und OH^- von Spuren im Papier verbliebener Natronlauge). Derartige Moleküle haben Abmessungen von 10 bis 17 \AA . Bei schlecht getrocknetem Papier könnten auch Hydronium-Ionen (H_2O mit angelagertem H^+) auftreten, deren Durchmesser etwa 4 \AA wäre. Endlich besteht noch die Möglichkeit, daß Clophen nach dem Imprägnieren Verunreinigungen in Form von Harzsäuren löst, z. B. Kolophonium. Die Größe dieser Ionen liegt ebenfalls in der Größenordnung von 10 \AA .

Die Größe der Höchstwerte von $\tan \delta$ muß nach Gl. (25) der Zähigkeit umgekehrt proportional sein. Ein Vergleich der Werte aus Tafel 1 ergibt

$$\frac{\tan \delta_{i \max 104}}{\tan \delta_{i \max 85}} = \frac{0,0623}{0,0362} = 1,72 \quad \text{bzw.} \quad \frac{\eta_{85}}{\eta_{104}} = \frac{9,6 \text{ cP}}{5,5 \text{ cP}} = 1,74$$

und

$$\frac{\tan \delta_{i \max 85}}{\tan \delta_{i \max 78}} = \frac{0,0362}{0,0257} = 1,41 \quad \text{bzw.} \quad \frac{\eta_{78}}{\eta_{85}} = \frac{12,0 \text{ cP}}{9,6 \text{ cP}} = 1,25.$$

Die Abweichungen von den theoretischen Werten sind unter Berücksichtigung der möglichen Meßfehler klein. Daraus folgt, daß sich die Ionenzahl nur mit der Feldstärke merklich ändert, von der Temperatur aber nur wenig abhängig ist.

Gl. (25) gibt den Verlustfaktor je Ionenpaar an, wie er etwa in einem Tränkmittel-Meßkondensator gemessen wird. Beim Papierkondensator dagegen entsteht Blindleistung auch in den Papierlagen, während die Verlustleistung durch die hier betrachtete Ionenleitung nur in den Tränkmittelspalten auftritt. Da man die Ionenzahl ohnehin nur nach der Größenordnung abschätzen kann, wird zur Vereinfachung angenommen, daß alle Spalte gleiche Dicke haben, die von der Papierdicke, Lagenzahl und Papiersatinage nur wenig abhängt. Unter diesen Voraussetzungen ist der gemessene Verlustfaktor $(\tan \delta_i)/N^*$ bezogen auf ein Ionenpaar, um den Faktor k kleiner als der berechnete, dabei bedeuten die Indizes T und P „Tränkmittel“ und „Papier“. Es ist somit

$$\frac{\tan \delta_i^*}{N} = k \frac{\tan \delta_i}{N} \quad \text{und} \quad k \approx \frac{1}{1 + (\epsilon_T/\epsilon_P)(d_P/d_T)} < 1. \quad (36)$$

Der Faktor k ist bei normalen Leistungskondensatoren mit Chlophen oder Mineralöl 0,2 bis 0,7. Für den Versuchskondensator (Bild 2) ist $k = 0,2$. Nach Gl. (25) und Tafel 1 ergibt sich die Zahl N der Ionenpaare je Volumeneinheit für diesen Kondensator zu

$$N = 3 \pi \epsilon_r \epsilon_0 \omega \eta R (n^2 e^2 k)^{-1} \tan \delta_i^* \approx 1 \text{ bis } 2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3},$$

für $n = 1$. Im Kubikzentimeter befinden sich $2,8 \cdot 10^{21}$ Moleküle des Clophens A 50, so daß auf je $1,5$ bis $3 \cdot 10^8$ Clophenmoleküle nur ein Ion kommt und der mittlere Abstand zwischen zwei Ionen 500 bis 700 Moleküldurchmesser ist, d.h. in der Größenordnung der Spaltdicke liegt. Bei diesen großen Abständen können die Kräfte der Ionen aufeinander vernachlässigt werden. Die am Anfang gemachte Voraussetzung ist also zulässig.

Gl. (24) und (25) geben den Verlustfaktor für ein Ionenpaar an. Dividiert man die gemessenen Werte für den

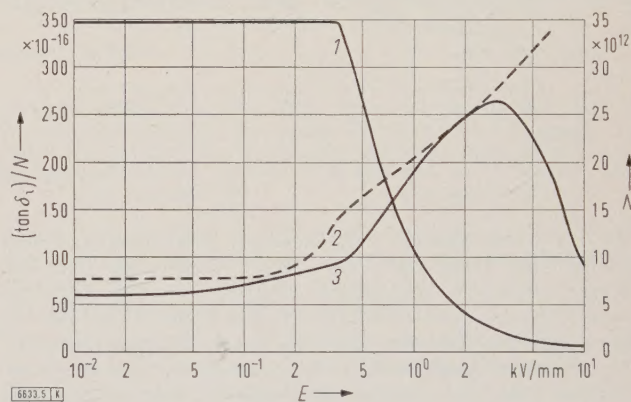


Bild 5. Verlustfaktor $\tan \delta_i$ je Ion und Ionenzahl N , abhängig von der Feldstärke E in einem Kondensatorwickel.

- 1 $(\tan \delta_i)/N = f(E)$
- 2 $N = f(E)$ rechnerisch ermittelt; vorausgesetzt, daß Ionen von den Papierfasern nicht festgehalten werden
- 3 $N = f(E)$ für $\phi = 104^\circ\text{C}$ aus den Messungen berechnet

Verlustfaktor $\tan \delta_i^*$ durch den gerechneten Verlustfaktor je Ionenpaar, so ergibt sich N als Funktion der Feldstärke (Bild 5). Bei großen Feldstärken nähert sich die Ionenzahl nicht, wie man eigentlich erwartet, einem Sättigungswert, sondern nimmt wieder ab. Es scheint so, als ob bei hohen Ionengeschwindigkeiten einige Ionen so weit in das Papier eindringen, daß sie durch die Austauschkräfte zwischen den Hydroxylgruppen des Papiers und den Ionen an den Papierfasern festgehalten werden. Auch bei kleinen Feldstärken wird ein Teil der Ionen noch im Papier festgehalten, die erst bei höheren Feldstärken wieder losgerissen werden.

Zur Kontrolle wurde eine Verlustfaktorkurve an einem mit Clophen A 50 getränkten Glimmerkondensator aufgenommen [2] und nachgerechnet. Es zeigte sich, daß die Funktion $N = f(E)$ mit wachsender Feldstärke stärker an-

steigt als beim Papierkondensator und bei hohen Feldstärken einem Sättigungswert zustrebt. Bild 6 zeigt zum Vergleich die Änderung der Ionenanzahl mit größer werdender Feldstärke bei beiden Kondensatoren. Die Ionenanzahl N wurde auf die Ionenanzahl N' bei $\alpha = 1$ bezogen. Beim Glimmerkondensator tritt bei hohen Feldstärken, wie zu erwarten war, keine Ionenverarmung ein, da der Glimmer im Gegensatz zu Papier nicht porös ist und daher keine Ionen festhalten kann.

Garton beschreibt ein Verfahren zum Berechnen der Ionenanzahländerung als Funktion der Feldstärke [1]. Die Ionenanzahl wird aus der Anzahl der in einer Sekunde dissoziierenden Ionen und ihrer mittleren Lebensdauer bestimmt. Infolge der größeren Ionengeschwindigkeit bei höheren Feldstärken wird die Zeit, in der sich die Ionschichten entgegengesetzten Vorzeichens treffen, kürzer. Die Zahl der durch Rekombination verschwindenden Ionen je Sekunde wird daher mit größer werdender Feldstärke immer kleiner, wodurch die Ionenanzahl ansteigt.

Mit den Bezeichnungen N_0 für die Ionenanzahl bei der Feldstärke $\hat{E} = 0$ und Z für die Anzahl der dissoziierbaren Moleküle je Volumeneinheit ergibt sich nach [1] für das Verhältnis N/N_0 bei $Z/N > 10^3$

$$N/N_0 = \sqrt{Q}. \quad (37)$$

Diese Funktion $Q = f(\alpha)$ ist in Bild 7 aufgetragen. Nach Gl. (37) wurde daraus die Ionenanzahl $N = f(E)$ berechnet und

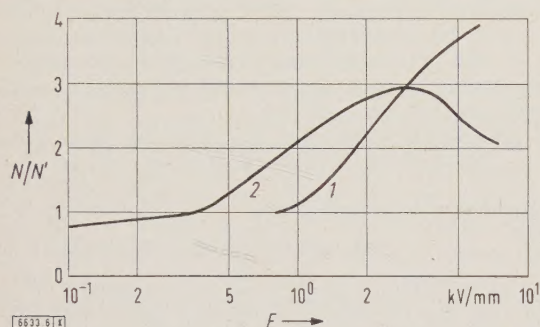


Bild 6. Verhältnis der Ionenanzahl N/N' , abhängig von der Feldstärke E .
1 Glimmkondensator 2 Papierkondensator

in Bild 5 als Kurve 2 eingezeichnet. Diese Kurve stimmt mit der aus Messungen des $\tan \delta$ berechneten Funktion (Bild 5, Kurve 3) annähernd überein. Abweichungen ergeben sich vor allem bei sehr großen Feldstärken, wo ein immer größerer Teil der Ionen im Papier festgehalten wird. Diesen Einfluß berücksichtigt die Gartonsche Theorie nicht.

Damit man den Einfluß des Papiers ausschaltet, wurde der Verlustfaktor eines sehr dünnflüssigen Tränkmittels — Clophen T 64 — in einem Meßkondensator mit dem Abstand $d = 2$ mm gemessen (Bild 8). Die mit Hilfe von Gl. (37) berechnete Ionenanzahl $N = f(E)$ ergibt, multipliziert mit dem nach Gl. (20), (21) und (25) berechneten Verlustfaktor, je Ionenpaar die in Bild 8 eingezeichnete Kurve 1. Gemessene und gerechnete Kurve stimmen annähernd überein. Etwas größere Abweichungen ergeben sich im Gebiet $\alpha < 1$.

Die Rechnung ergibt für $\alpha = 1$ für das Verhältnis

$$R/n = 0,1 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$$

und eine Ionenanzahl N' für den Höchstwert $\tan \delta$ von

$$N' = 3,2 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}.$$

Diese sehr kleine Ionenanzahl ist durch das gut gereinigte Clophen bedingt. Der kleine Wert des Verhältnisses R/n deutet auf H^+ - und OH^- -Ionen hin. Ein Vergleich mit den Messungen am getränkten Papierkondensator zeigt, daß die Leitfähigkeitsverluste im Papierkondensator offenbar auf große Molekülonen zurückzuführen sind, die nicht von vornherein im Tränkmittel sind, sondern erst in Verbindung

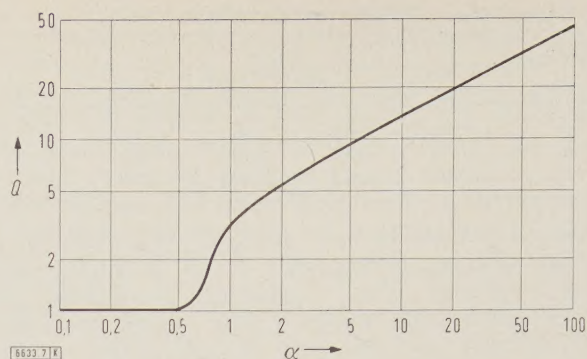


Bild 7. Hilfsfunktion $Q = f(\alpha)$ nach Garton zum Berechnen der Änderung der Ionenanzahl, abhängig von der Feldstärke E .

mit dem Papier gebildet werden können. Entsprechend wird an Tränkmittelproben, die dem getränkten Kondensator entnommen werden, stets eine erheblich größere Leitfähigkeit gemessen als am reinen Clophen vor dem Tränken.

Der Verlauf der Funktion $\tan \delta = f(E)$ bei steigender und fallender Spannung ist irreversibel, wie Bild 2, Kurve 1, zeigt. Beim Herabsetzen der Spannung sind die Leitfähigkeitsverluste kleiner geworden. Diese Erscheinung versteht man an Hand des Bildes 5. Bei hoher Feldstärke nimmt die Ionenanzahl rasch ab, da ein Teil der Ionen tief in das Geflecht der Papierfasern eindringt und durch die Austauschkräfte zwischen Hydroxylgruppen und Ionen festgehalten wird. Läßt man den Kondensator längere Zeit ohne Spannung stehen, gelangen die Ionen durch die Temperaturbewegung langsam wieder in den Flüssigkeitspalt zurück, und es stellt sich der ursprüngliche Zustand wieder ein.

Auffällig ist noch die Verschiebung des Höchstwertes von $\tan \delta$ zu höherer Feldstärke \hat{E}' , die nach Gl. (14) auf eine Vergrößerung von R/n hindeutet. Das kann so gedeutet werden, daß es nicht nur eine einzige Ionensorte nach Größe und Wertigkeit gibt, sondern daß R/n vielmehr über einen gewissen Bereich streuen wird. Es ist zu erwarten, daß die kleineren Ionen eher und tiefer in das Papier eindringen als die größeren, so daß das Verhältnis R/n im Mittel größer wird.

Ein irreversibles Verhalten des Verlustfaktors ergibt sich auch im Meßkondensator, wenn die Feldstärke über \hat{E}' hinaus gesteigert wird ($\alpha > 1$), so daß die H^+ -Ionen an der metallischen Gegenelektrode anstoßen und zum Teil entladen werden. Dadurch tritt wieder Ionenverarmung ein, außerdem wird der mittlere Ionenradius größer — mehr OH^- als H^+ —, worauf auch die Verschiebung des Höchstwertes von $\tan \delta$ hindeutet.

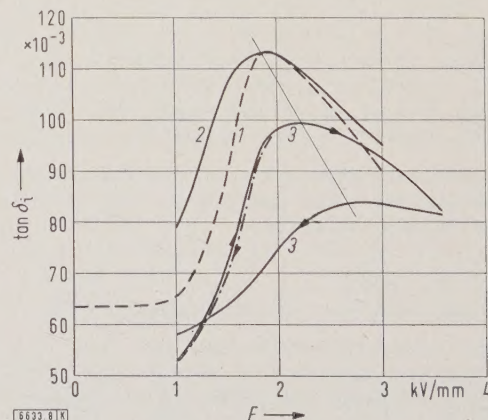


Bild 8. Verlustfaktor $\tan \delta_i$ durch Ionenleitung in einem zylindrischen Meßkondensator mit Clophen T 64 für eine Spaltbreite $d = 0,2$ cm, dynamische Viskosität des Clophens T 64 mit $\eta = 6,2$ cP und bei verschiedenen Temperaturen,

- 1 berechnete Kurve bei $T = 66^\circ \text{C}$
- 2 gemessene Kurve bei $T = 65^\circ \text{C}$
- 3 Hystereseschleife bei $T = 55^\circ \text{C}$

Schlußfolgerung

Die wichtigsten Schlußfolgerungen für die Praxis ergeben sich aus den Gl. (30), (31) und (32). Danach ist der Verlustfaktor je Ionenpaar, solange die Ionen frei beweglich sind, der Zähigkeit, der Frequenz und dem Ionenradius umgekehrt proportional. Die Feldstärke, bei der die Ionen innerhalb einer Halbwelle den ganzen Flüssigkeitsspalt gerade durchlaufen, ist der Spaltdicke, der Zähigkeit, der Frequenz und dem Ionenradius proportional. Bei höheren Feldstärken sinkt der Verlustfaktor mit steigender Feldstärke. Leistungskondensatoren werden immer in diesem Bereich betrieben. Die Verluste durch Ionenleitung sind dann um so kleiner, je geringer die Ionenanzahl, die Spaltdicke, die Tränkmittelzähigkeit, die Frequenz und der Ionenradius sind. Sie sind nur beim Verwenden von Werkstoffen hinreichender Reinheit gegenüber den Papierverlusten vernachlässigbar klein und können bei gealterten Kondensatoren, z. B. in mit Mineralöl getränkten Kondensatoren nach längerem Betrieb, oder beim Verwenden schlechter Werkstoffe die Gesamtverluste merklich erhöhen.

Zusammenfassung

Ein getränktes und geschichtetes Dielektrikum enthält stets Ionen, die durch das Wechselfeld in den Flüssigkeitsspalten bewegt werden und dabei dielektrische Verluste verursachen. Die Bewegungsgleichungen werden unter Berücksichtigung des Stokesschen Gesetzes aufgestellt. Daraus werden Verluststrom, Verlustleistung, Verlustfaktor und die

Ionengeschwindigkeit berechnet und mit Erfahrungswerten verglichen. Es zeigt sich, daß die Ionenzahl je Volumeneinheit bei Papierkondensatoren nicht konstant ist, sondern zunächst mit größer werdender Feldstärke zunimmt und bei hoher Feldstärke wieder abnimmt, da die im Tränkmittel befindlichen Ionen durch die Hydroxylgruppen des Papiers festgehalten werden. Die Untersuchungen ergaben, daß im reinen Clophen nur wenige sehr kleine Ionen vorhanden sind. Die relativ großen Ionen im getränkten Papierkondensator entstehen anscheinend durch die Beladung von Clophenmolekülen mit kleineren Ionen, z. B. H^+ - und OH^- -Ionen, oder durch Bildung von Ionenschwärmen. Es können aber auch Ionen von Harzsäuren sein, deren Größe ebenfalls 10 Å beträgt.

Schrifttum

- [1] Garton, C. G.: Dielectric loss in thin films of insulating liquids. J. instn. electr. Eng., London, (II) Bd. 88 (1941) S. 103–120.
- [2] Liebscher, F.: Über die dielektrischen Verluste und die Kurvenform der Ströme in geschichteten Isolierstoffen bei hohen Wechselfeldstärken von 50 Hz. Wiss. Veröff. Siemens-Konzern Bd. 21 (1943) H. 2, S. 214–248.
- [3] Handbuch der experimentellen Physik. Hrsg. Wien-Harms. Bd. 12, Teil 1. Akademische Verlagsgesellschaft mbH, Leipzig 1932. S. 120, 157, 210, 211, 278, 357, 358.
- [4] Nikuradse, A.: Über Elektrizitätsleitung bei Feldstärken bis zu Entladungs- und Ionenkonstanten in dielektrischen Flüssigkeiten. Arch. Elektrotechn. Bd. 22 (1929) S. 283–304.
- [5] Hoór, M. v.: Neue Beiträge zur Naturgeschichte dielektrischer Körper. ETZ Bd. 22 (1901) S. 170–172, 187–191, 213–215, 716–719, 749–751, 781–785.
- [6] Schumann, W. O.: Stromleitung in einem Dielektrikum, in dem nur eine Ionenart beweglich ist. Z. Phys. Bd. 79 (1932) S. 532–549.
- [7] Liebscher, F.: Neuere Erkenntnisse über Erwärmungs- und Zerstörungsvorgänge in geschichteten Isolierstoffen. ETZ Bd. (64) (1943) S. 425–427 u. 450–453.

Meßmethode zur Ionisations-Verlustmessung und Messung des zeitlichen Ablaufes von Entladungsimpulsen bei Wechselspannung

Von Eberhard Baumann, Kassel*)

DK 621.317.384.017.143

Finden in elektrischen Geräten oder in Versuchsanlagen Entladungen statt, so interessieren ihr zeitlicher Verlauf und die Höhe der Ionisationsverluste. Zur meßtechnischen Trennung der Ionisationsverluste von den Grundverlusten¹⁾ wurde am Hochspannungsinstitut der Technischen Hochschule Karlsruhe eine Meßbrücke mit Verstärker gebaut. Nachstehend soll darüber berichtet werden.

Allgemeines

Die Gesamtverluste in einem Dielektrikum bestehen aus den Ionenleitungsverlusten, den Polarisationsverlusten und — beim Auftreten von Entladungen — aus den Ionisationsverlusten. Mit einem selektiven Nullindikator — Vibrationsgalvanometer —, der auf die Frequenz der sinusförmigen Meßspannung abgestimmt ist, wird in der klassischen Scheringbrücke ein Verlustfaktor gemessen, aus dem diese Gesamtverluste berechnet werden.

Wenn zum Nullabgleich der Scheringbrücke dagegen ein breitbandiger Nullindikator — Oszillograph — verwendet wird, erhält man einen zweiten Abgleich und damit einen anderen Verlustfaktor, aus dem man die Grundverluste, d. h. die Ionenleitungs- und Polarisationsverluste, berechnet. Die Differenz der beiden Verlustfaktoren gibt einen Verlustfaktor, der den reinen Ionisationsverlusten entspricht. Durch zwei Brückenabgleiche mit verschiedenen Nullindikatoren gelingt es also, den Anteil der Ionisationsverluste an den Gesamtverlusten festzustellen.

Voraussetzungen für die Bestimmung der Grundverluste, die keine Ionisationsverlustanteile enthalten, sind:

1. Die Hochspannung muß rein sinusförmig sein,
2. der Innenwiderstand der Spannungsquelle muß Null sein,

*) Dr.-Ing. E. Baumann ist Mitarbeiter des Hochspannungsinstitutes der AEG in Kassel. Diese Arbeit entstand während seiner Tätigkeit am Hochspannungsinstitut der TH Karlsruhe.

1) Geletz, J.-P.: Die getrennte Messung der Glimmentladungsverluste in einem inhomogenen Isolierstoff. ETZ-A Bd. 81 (1960) H. 4, S. 129–132.

3. der Nullindikator muß die Diagonalspannung der Brücke von weniger als 50 Hz bis zur höchsten vorkommenden Frequenz der Fourierkomponenten der Entladungsimpulse auf seiner Braunschen Röhre abbilden.

Nach Abgleich der Meßbrücke mit einem breitbandigen Nullindikator bleiben auf dem Oszillographenschirm noch die Impulse der Entladungen sichtbar. In der negativen Spannungshalbwelle treten nur Impulse negativer Polarität auf und entsprechend in der positiven Halbwelle nur positive Impulse. Also enthalten diese Impulsgruppen, die sich periodisch mit 50 Hz wiederholen, eine 50-Hz-Komponente. Diese 50-Hz-Komponente des Ionisationsverluststromes wird beim Abgleich der Brücke mit dem Breitband-Oszillographen nicht mit abgeglichen. Sie kann nur mit einem selektiven Nullindikator gemessen werden.

Verwendet wurde ein breitbandiger Nullindikator, dessen obere Grenzfrequenz 8,8 MHz und dessen untere Grenzfrequenz rd. 40 Hz beträgt. Damit kann man noch kurzzeitige Entladungsimpulse von nur 10^{-7} s Dauer in ihrem zeitlichen Verlauf messen. Die Ladungsmenge dieser Impulse wurde mit $3 \cdot 10^{-13}$ C/Imp. bei einer Empfindlichkeit der Meßanordnung von $3 \cdot 10^{-14}$ C/Imp. bestimmt.

Beispiele

Koronaentladungen an einer Funkenstrecke Spitze—Platte in Luft bei Wechselspannung

Bisher konnte man den zeitlichen Ablauf der Entladungen bei Wechselspannung nicht genau messen. Bis jetzt

verdeckten die viel größeren kapazitiven Ladeströme die Impulse, oder die Impulse wurden durch komplizierte Vierpole verzerrt.

In der Meßbrücke zur Bestimmung der Koronaverluste sind auf dem Oszillographenschirm die Entladungen jeder Halbwelle zu sehen. Dazu ist es notwendig, den kapazitiven Ladestrom der Prüfkapazität C (Bild 1) in der Brücke zu kompensieren. Mit Hilfe eines Brückenverstärkers ohne Übertrager im Nullzweig der Meßbrücke und durch richtige Wahl der Zeitkonstanten des Verstärkers ist es möglich, den zeitlichen Ablauf der Impulse auf dem Schirm einer Kathodenstrahlröhre sichtbar zu machen. Damit können bei Wechselspannung durch Triggern

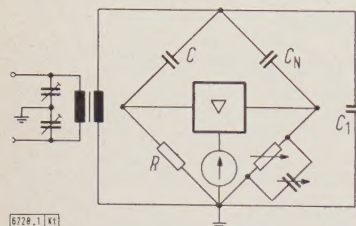


Bild 1. Abgeänderte Scheringmeßbrücke mit Verstärker, sowie Parallelkapazität C_1 . Nullindikator je nach Messung Kathodenstrahl-Oszillograph oder Vibrationsgalvanometer.

die Impulse sowohl der positiven als auch der negativen Halbwelle auf dem Oszillographenschirm getrennt gezeigt werden. Die Spannungsimpulse werden nur an einem einfachen RC-Glied verformt, das durch die Brückenelemente und ihre Ankopplung an den Kathodenverstärker gebildet wird. Der wahre zeitliche Ablauf der Entladungen wird gefunden, indem man (wenn nötig) den Einfluß dieses RC-Gliedes berücksichtigt. Bild 2 zeigt den zeitlichen Verlauf negativer Impulse einer Funkenstrecke Spitze—Platte in Luft. Die Rückenhalbwertzeit der Impulse ist etwa $t_r = 3 \cdot 10^{-7}$ s, die Impulshöhe $\hat{i} = 4,3 \mu\text{A}$, und damit ist die Ladung $Q = 1,3 \cdot 10^{-12}$ C. Die Impulse der negativen Spitze haben nur wenig Streuung, wie Bild 2 zeigt. Die positiven Impulse streuen naturgemäß und entsprechend der sich sinusförmig ändernden Spannung stärker.

Entladungen an einer Spitze in Öl im geschichteten Dielektrikum bei Wechselspannung

Die Anordnung Spitze—Platte unter Öl (Bild 3) zeigt ausmeßbare Impulse, wenn durch eine Isolierstoffbarriere der Durchbruch verhindert wird. Bild 4 zeigt den zeit-

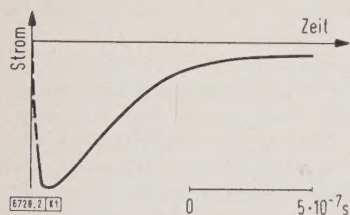


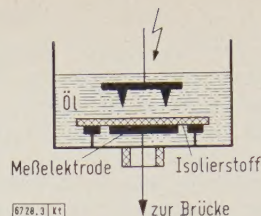
Bild 2. Negativer Entladungsimpuls einer Funkenstrecke Spitze—Platte in Luft bei Wechselspannung.

lichen Verlauf dieser Entladungen, wenn die positive Halbwelle der Wechselspannung an den Spitzen liegt. Die Entladungen dauern in Öl wesentlich länger als in Luft. So ist z. B. in Bild 4 die Rückenhalbwertzeit $t_r = 3 \cdot 10^{-6}$ s und die Impulshöhe $\hat{i} = 150 \mu\text{A}$, so daß in einer Entladung $Q = 4,5 \cdot 10^{-10}$ C transportiert wird.

Gesamt- und Grundverlustfaktoren, gemessen an den Anordnungen Spitze—Platte in Luft und unter Öl

Der in der Koronabrücke (Bild 1) gemessene Grundverlustfaktor von Spitzen in Luft ist als untere Kurve in Bild 5 aufgetragen, dagegen zeigt die obere Kurve den Verlustfaktor, der den Gesamtverlusten entspricht. Man berechnet die Ionisationsverluste aus der Differenz zwischen Gesamt- und Grundverlustfaktoren. In dem Beispiel

Bild 3. Anordnung von Spitzen zwischen zwei Platten mit zwischengeschaltetem Isolierstoff unter Öl.



Spitze—Platte in Luft (Bild 5) treten unterhalb einer Spannung von 4,7 kV keine Entladungen auf; die Ionisationsverluste sind somit Null und die aus dem Grundverlustfaktor berechneten Gesamtverluste sind bis zu dieser Spannung gleich den Grundverlusten. Ist die Spannung größer als 4,7 kV, so steigt der in der klassischen Scheringbrücke gemessene Gesamtverlustfaktor und damit der Gesamtverlust stark an. Der Grundverlustfaktor bleibt weiterhin konstant. Aus den niedrigen Grundverlusten folgt — sie liegen unter der Genauigkeitsgrenze der Brücke —, daß die Gesamtverluste bei Entladungen in Luft und bei kleinen Elektrodenabständen überwiegend Ionisationsverluste sind.

Die Entladungen unter Öl und damit die Verlustfaktoren zeigen ein gänzlich anderes Verhalten (Bild 6), wenn zwischen den Elektroden eine Isolierstoffbarriere nach Bild 3

Strom $\hat{i} = 1,5 \cdot 10^{-4}$ A
Ladung $Q = 4,5 \cdot 10^{-10}$ C
mittlere Rückenhalbwertzeit
 $t_r = 3 \cdot 10^{-6}$ s

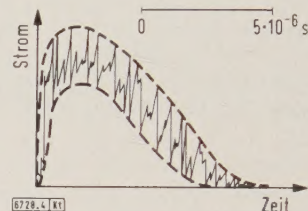


Bild 4. Positive Entladungsimpulse einer Funkenstrecke Spitze—Platte unter Öl mit zwischengeschalteter Isolierplatte.

angebracht ist. Die aus den Verlustfaktoren bestimmten Ionisationsverluste werden bei geschichtetem Dielektrikum unter Öl vernachlässigbar klein gegenüber den Ionenleitungs- und den Polarisationsverlusten. Die zur Erzeugung von Ladungsträgern aufgewendete Verlustleistung ist viel kleiner als die Leistung, die notwendig ist, um diese Ionen zu bewegen und Oberflächenladungen auf den Isolierstoffoberflächen umzuladen. Die Gesamtverlustleistung wird hier also zum Transport der in den Entladungen gebildeten Ionen benötigt.

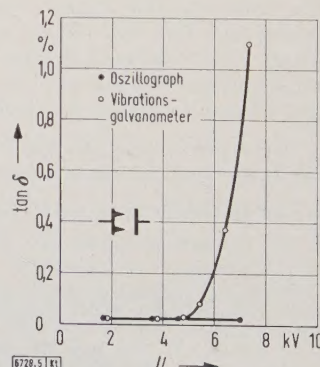
Kritik der Anwendbarkeit der Koronameßbrücke

In einigen besonders einfachen Fällen hat sich der Einsatz der abgeänderten Scheringbrücke zum Bestimmen der Koronaverluste und des zeitlichen Ablaufes der Entladungen bewährt. Aus der Verlustfaktormessung und der Messung des zeitlichen Ablaufes der einzelnen Entladungen können Rückschlüsse auf die physikalischen Vorgänge im Dielektrikum gezogen werden.

In der Praxis sind die auf ihre Entladungen hin zu untersuchenden Prüflinge weit komplizierter aufgebaut und haben eine größere Ausdehnung als im Beispiel des Bildes 3.

Bild 5. Verlustfaktor $\tan \delta$ abhängig von der angelegten Wechselspannung U für eine Funkenstrecke Spitze—Platte in Luft mit 2 Spitzen.

Die untere Kurve zeigt den Grundverlustfaktor $\tan \delta_1$, gemessen mit Kathodenstrahl-Oszillograph, die obere Kurve den Gesamtverlustfaktor $\tan \delta_2$, gemessen mit Vibrationsgalvanometer.



Die Meßbrücke kann nur die Impulsform der Entladung wiedergeben, wie sie am Widerstand R auftritt. Wird ein langes Zuleitungskabel vom Prüfling (C) zur Brücke verwendet, so werden die Impulse verformt.

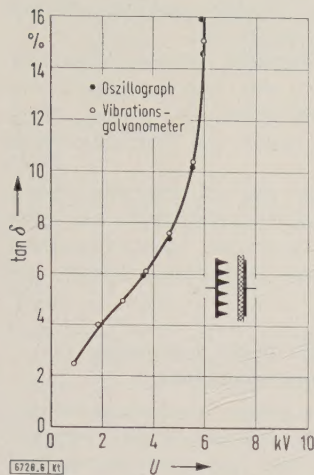


Bild 6. Verlustfaktor $\tan \delta$ einer Isolieranordnung. Spitzen und Isolierplatte zwischen Plattenelektroden unter Öl. Die beiden Verlustfaktoren für die Gesamt- und Grundverluste sind nahezu gleich.

anschlusspunkten nicht mehr meßbar sind. In einem solchen Fall wird es nicht gelingen, zwischen Grund- und Gesamtverlusten zu unterscheiden.

Eine der häufigsten Schwierigkeiten bei der Beurteilung von Entladungen in elektrischen Geräten ist das Auftreten von Eigenschwingungen. In Transformatoren und Wandlern haben die Entladungsimpulse gekoppelte, schwingungsfähige Leitungsgebilde zu durchlaufen. Erst dann können sie an den Meßklemmen abgenommen und der Brücke zugeführt werden. Finden Reflexionen auf dem Wege von

Bei der Messung der Impulsformen, die infolge der Koronaerscheinung an Freileitungen oder Reusenordnungen auftreten, findet außerdem bei der Ausbreitung der Impulse auf dem sprühenden Leiter noch eine vom Laufweg von der Entladungsstelle bis zur Meßbrücke oder deren Anschluß abhängige Verformung durch Dämpfung und Überlagerung der Impulse statt. Man muß also bei räumlich ausgedehnten sprühenden Leitern die Dämpfung und Verformung der Impulse je nach ihrer Laufzeit berücksichtigen.

Häufig sollen in Kabeln und Kondensatoren Entladungen festgestellt werden. Hier kann die Dämpfung der Impulse so groß werden, daß sie zwischen den Brücken-

der Entladungsstelle bis zur Brücke statt, so werden die Impulse verzerrt.

Eine Meßanordnung zum Aufzeichnen des zeitlichen Ablaufes von Entladungsimpulsen darf keine Reflexions- oder Stoßstellen enthalten. Der Brückenwiderstand R muß daher an das Zuleitungskabel angepaßt werden.

Die Meßbrücke wird hauptsächlich zur gründlichen Untersuchung möglichst weniger Entladungen in einfachen Isolieranordnungen verwendet. Bei Prüflingen mit großen Abmessungen und vielen Entladungsstellen wird die Impulsanalyse wegen der Überlappung und Überdeckung der Impulse schwierig. Finden z. B. zahlreiche Entladungen in Luft statt, so können die Ionisationsverluste die Grundverluste stark überwiegen (Bild 5). Auf dem Oszillographenschirm werden daher nur noch die Entladungen allein sichtbar, da der Grundverlustfaktor für die messende Beobachtung zu klein ist.

Mit der Scheringbrücke wird ein Verlustfaktor gemessen, der den Ionisationsverlusten plus Grundverlusten — das sind die Gesamtverluste — entspricht, wenn man bei rein sinusförmiger Hochspannung zum Nullabgleich einen selektiven Nullindikator — Vibrationsgalvanometer — verwendet. Dies ist leicht einzusehen, weil die in den Entladungen umgesetzte hochfrequente Energie aus dem 50-Hz-Netz geliefert werden muß. Bei rein sinusförmiger Spannung muß also eine 50-Hz-Verluststromkomponente fließen. Diese wird in der klassischen Scheringbrücke mit einem selektiven Nullindikator mitabgeglichen.

Zusammenfassung

Durch die konsequente Weiterentwicklung der bisher bekannten Verfahren gelang es, den Frequenzbereich und die Empfindlichkeit einer Brückenanordnung so weit zu steigern, daß die einzelnen Entladungsimpulse bei Wechselspannung — nach Halbwellen getrennt — oszillographisch untersucht werden können. Daneben können die Verlustfaktoren für die Grundverluste und für die Gesamtverluste in der abgeänderten Scheringbrücke gemessen werden. Aus der Differenz der Verlustfaktoren läßt sich die Ionisationsverlustleistung bemessen.

Die getrennte Messung der Glimmentladungsverluste in einem inhomogenen Isolierstoff

Von Jean-Philippe Gelez, Saint-Mandé/Frankreich*)

DK 621.317.384.015.532

Bei der Beanspruchung von Isolierstoffen mit genügend hohen Spannungen treten in Hohlräumen dieser Stoffe Glimmentladungen auf, die Ionisationsverluste verursachen. Ein Meßverfahren zum Bestimmen dieser Verluste wird nachstehend beschrieben.

Die Verluste und das Ersatzschaltbild des Isolierstoffes

Liegt an einem inhomogenen Isolierstoff eine Wechselspannung, so verursacht sie von verschiedenen Faktoren — Spannung, Frequenz, Temperatur, Feuchtigkeit, Druck usw. — abhängige Verluste. Diese können in drei bestimmte Gruppen eingeteilt werden:

1. die ohmschen Leitfähigkeitsverluste, die vom Widerstand der Isolierstoffe — innerer Widerstand und Oberflächenwiderstand — herrühren,
2. die dielektrischen Hysteresis- oder Polarisationsverluste — hier fließt ein Strom, der dem kapazitiven Strom naheilt; er hat somit eine Komponente, die mit der Spannung in Phase liegt und eine Wirkleistung verursacht,
3. Ionisationsverluste, die auftreten, wenn sich im Isolierstoff Hohlräume befinden, und sich bei genügender Feldstärke eine Glimmentladung bildet.

Gegenüber den ersten zwei Verlustarten sind die Ionisationsverluste durch eine zeitliche Unterbrechung charakterisiert, denn die Entladung ist zeitlich viel kürzer als die Dauer einer Halbperiode der 50-Hz-Wechselspannung.

Das klassische Ersatzschaltbild eines Isolierstoffes ist aus Bild 1 ersichtlich. Die drei Kondensatoren C_1 , C_2 und C_3 stellen den Isolierstoff, der Kondensator C_4 eine Spannungsquelle dar. Der Strom wird als Spannungsabfall an den Klemmen des ohmschen Widerstandes R gemessen.

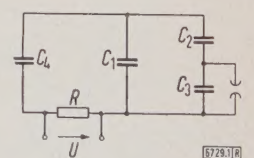


Bild 1. Ersatzschaltbild eines Isolierstoffes. Erläuterungen im Text.

Abgesehen von den erzwungenen Einschaltvorgängen der Spannung und des Stromes mit Netzfrequenz, entspricht der Spannungsabfall an den Klemmen des ohmschen Widerstandes R nach einem Kurzschluß des Kondensators C_3 den freien Schwingungen, d. h. dem Ausgleichsvorgang des

*) Dipl.-Ing. J.-P. Gelez ist Mitarbeiter des Laboratoire Central des Industries Electriques in Fontenay-aux-Roses/Frankreich.

Stromkreises. Bei den gewählten Werten für die Kapazitäten C_1 und C_4 mit

$$C_1 C_4 / (C_1 + C_4) = 100 \text{ pF} \text{ und des Widerstandes } R = 1000 \Omega$$

bestimmt sich die Zeitkonstante des Entladungsvorganges zu $0,1 \mu\text{s}$. Man kann annehmen, daß die der 50-Hz-Spannung überlagerten Spannungsimpulse $1 \mu\text{s}$ später auf ihre Ausgangswerte abgeklungen sind, wobei der Wert der 50-Hz-Spannung innerhalb dieser Zeit praktisch gleichgeblieben ist.

Wenn die Spannung U an den Klemmen des Widerstandes R auf dem Schirm eines Kathodenstrahl-Oszillographen beobachtet wird, kann die 50-Hz-Spannungskurve während des Impulses leicht interpoliert werden (Bild 2).

Auf diese Weise kann der 50-Hz-Strom beobachtet werden, der im Isolierstoff fließt, so als ob keine Ionisation vorhanden wäre. Hieraus können die Grundverluste, d. h. Hysterisis und Leitfähigkeitsverluste, bestimmt werden.

Verlustleistungen bei einer rein sinusförmigen Spannung

Vorausgesetzt wird, daß die Impedanz der Spannungsquelle Null und die Spannung frei von Oberschwingungen ist. Die Leitfähigkeitsverluste und die dielektrischen Hysterisisverluste sind linear bis zu einer bestimmten elektrischen Feldstärke. Wird diese überschritten, so wird der Strom mit der Grundfrequenz 50 Hz von Oberschwingungen verzerrt. Diese Stromkurve kann durch eine Fourier-Analyse in die 50-Hz-Grundschwingung und ihre Oberschwingungen zerlegt werden.

Die Verlustleistung \mathfrak{P} im Isolierstoff wird aus dem skalaren Produkt der Spannung und des Stromes einschließlich aller Oberschwingungen gebildet. Unter der Voraussetzung einer rein sinusförmigen Spannung mit der Frequenz 50 Hz wird die Verlustleistung nur aus der 50-Hz-Komponente des Stromes \mathfrak{I}_{50} und der Spannung U_{50} gebildet. Damit erhält man:

$$\mathfrak{P} = \mathfrak{I}_{50} \cdot U_{50} = |\mathfrak{I}_{50}| |U_{50}| \cos \varphi.$$

Der Winkel φ ist der Phasenverschiebungswinkel zwischen der Grundschwingung des Stromes und derjenigen der Spannung. Die Produkte aus den Oberschwingungen des Stromes und der 50-Hz-Grundschwingung der Spannung sind immer Null.

Mit Hilfe der Fourier-Analyse können Ionisationsimpulse in unendlich viele Frequenzen aufgelöst werden, wobei jeder Einzelimpuls ein Frequenzspektrum $G(\omega)$ haben

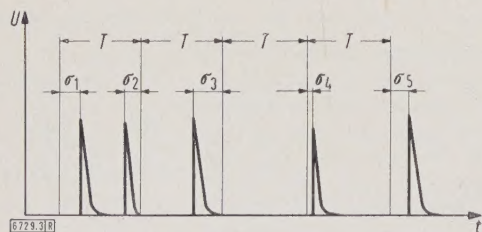


Bild 3. Verschiebung σ der Impulse gegenüber dem Zeitintervall T .

soll. Diese Impulse folgen in jedem Zeitintervall mit einer quadratischen Mittelverschiebung σ^2 gegenüber T (Bild 3). Das Spektrum des Quadrates dieser Impulsamplituden ist [1]:

$$R(\omega) = \left[1 - e^{-\sigma^2 \omega^2} + e^{-\sigma^2 \omega^2} \cdot 2 \frac{\pi}{T} S \left(\omega - 2m \frac{\pi}{T} \right) \right] \frac{G(\omega)^2}{T}.$$

Darin ist S die Diracsche Funktion, die das zweite Glied, ausgenommen die harmonischen Impulse vom $(2\pi/T)$ -Vielfachen, gleich Null macht. Das Spektrum wird in ein Linienspektrum, dessen Amplitude mit der Frequenz rasch abnimmt, und in ein kontinuierliches Spektrum aufgelöst. Das letztgenannte Spektrum hat im Hochfrequenzbereich die gleiche Form wie das des Einheitsimpulses.

Das Gesamtspektrum aller Impulse, erhalten aus der Addition aller Elementarspektren der Impulsgruppen und gekennzeichnet durch die Koeffizienten $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_n$, wird ebenfalls in ein Linienspektrum und in ein kontinuierliches Spektrum aufgelöst.

Die aus dem skalaren Produkt der als rein sinusförmig angenommenen Spannung mit der Frequenz 50 Hz und dem durch die Entladungsimpulse bedingten Ionisationsstrom gebildeten Verluste werden als Ionisationsverluste bezeichnet.

Verlustleistung, verursacht durch Ionisation, bei nicht sinusförmiger Spannung

Wird die Speisespannung der Brücke durch Oberschwingungen verformt, so ist das Zeitintegral, in dem Impulse auftreten, und damit die Zahl der Impulse veränderlich, und damit ändert die 50-Hz-Grundschwingung des Ionisationsstromes ihre Phasenlage und Amplitude. Die Ioni-

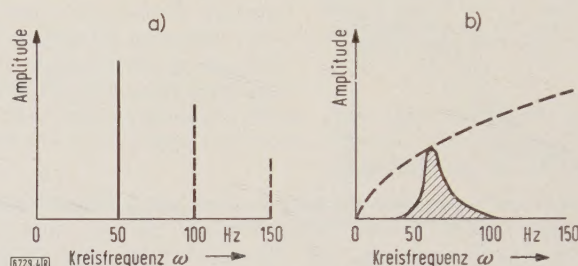


Bild 4. Der vom Vibrationsgalvanometer wahrgenommene Teil des Impulsspektrums.

a) Impulsspektrum,
b) Ansprechbereich des Vibrationsgalvanometers.

sationsverlustleistung der Grundwelle ändert sich dadurch. Die gesamte Ionisationsverlustleistung ist gleich der Summe der skalaren Produkte aus der Spannung und dem Strom, gebildet für die Grundfrequenz und die Oberschwingungen gleicher Frequenz.

Der Leistungsmesser ist in diesem Falle das einzige Meßinstrument, das die Gesamtverluste richtig messen kann. Eine Bestimmung des Verlustwinkels aus dieser Messung kann in diesem Fall nicht mehr sinnvoll definiert werden.

Prinzip der Verlustmessung

Die Ionisationsverluste werden mittelbar aus der Differenz zweier Ablesungen einer abgeglichenen und schaltungsmäßig etwas abgeänderten Scheringbrücke bestimmt, die an einer rein sinusförmigen Spannung liegt. Das Abgleichen der Brücke geschieht mit zwei verschiedenen Nullindikatoren, und zwar einmal mit einem auf 50 Hz abgestimmten Vibrationsgalvanometer und das andere Mal mit Hilfe eines Kathodenstrahloszillographen, dessen Verstärker für ein breites Frequenzband ausgelegt ist.

1. Das auf 50 Hz abgestimmte Vibrationsgalvanometer — es wird mit einer nach Größe und Richtung einstellbaren rein sinusförmigen Spannung erregt — wird gespeist

- von einer 50-Hz-Spannung mit allen ihren Oberschwingungen, die von den Hysterisis- und Leitfähigkeitsverlusten des Isolierstoffes stammen, und
- von der 50-Hz-Grundschwingung der Ionisationsspannungsimpulse sowie von einem kleinen Teil des zugehörigen kontinuierlichen Impulsspektrums.

Da das auf 50 Hz abgestimmte Vibrationsgalvanometer wie ein elektromagnetisches Filter wirkt und nicht vollkommen selektiv ist, so hat es eine große Empfindlichkeit

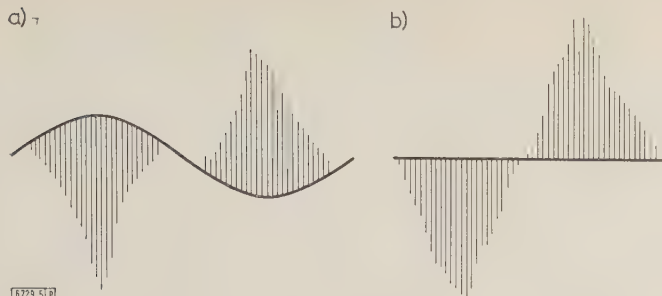


Bild 5. Bilder zweier Abgleichzustände auf dem Oszillographenschirm.
a) Abgleich mit dem Vibrationsgalvanometer,
b) Abgleich mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen.

bei 50 Hz und eine geringere für die Frequenzen in der Nähe von 50 Hz (Bild 4 a und b). Dieser infolge des Durchlaßbereichs des Galvanometers entsprechende zusätzliche Ausschlag ist gegenüber der Amplitude der 50-Hz-Grundschwingung vernachlässigbar klein. Mit einem unabgestimmten Galvanometer wird nur eine Verminderung der Meßempfindlichkeit und kein anderer Abgleichzustand erreicht. Auf diese Weise werden mittelbar die Gesamtverluste der 50-Hz-Komponente mit dem abgestimmten Vibrationsgalvanometer korrekt gemessen.

2. Ein anderer Abgleichzustand wird mit einem Kathodenstrahl-Oszillographen großer Bandbreite erreicht. Mit Hilfe des Schirmbildes kann die Brücke auf den Anteil der 50-Hz-Grundschwingung allein abgeglichen werden, in dem der Ionisationsimpuls nicht enthalten ist (Bild 5 a und b). Damit wird mittelbar nur der Anteil der Hysteresis- und Leitfähigkeitsverluste bei 50 Hz in der Brücke gemessen.

Die mit dem Vibrationsgalvanometer abgeglichene Brücke ermöglicht die Berechnung einer Kapazität C_1 und eines Verlustfaktors $\tan \delta_1$. Beim Abgleich mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen erhält man dagegen einen anderen Kapazitätswert C_2 und einen anderen Verlustfaktor $\tan \delta_2$.

Zum Schluß teilen sich die Verluste folgendermaßen auf:

$$\text{Gesamtverluste: } U^2 \omega C_1 \cdot \tan \delta_1 / (1 + \tan^2 \delta_1),$$

$$\text{Leitfähigkeits- und Hysteresisverluste:}$$

$$U^2 \omega C_2 \cdot \tan \delta_2 / (1 + \tan^2 \delta_2) \text{ und}$$

$$\text{Ionisationsverluste: } U^2 \omega \left(\frac{C_1 \tan \delta_1}{1 + \tan^2 \delta_1} - \frac{C_2 \tan \delta_2}{1 + \tan^2 \delta_2} \right),$$

worin U der Effektivwert der an den Prüfling angelegten Spannung ist und die Kapazitäten C_1 und C_2 im Reihenersatzbild verschiedene Größe haben. Die Spannungsgrundwelle 50 Hz der Ionisationsimpulse muß nicht unbedingt in Phase mit der Brückenspeisespannung liegen, und sie kann darum in eine Wirk- und in eine Blindkomponente aufgeteilt werden. Die Blindkomponente erhöht die scheinbare Kapazität.

Verwirklichung der Meßbrücke und Versuchsergebnisse

Angewendet wird eine aus der Scheringbrücke hergeleitete Brückenschaltung, in welcher der sonst an einer Hochspannung liegende Kondensator durch eine aus einem

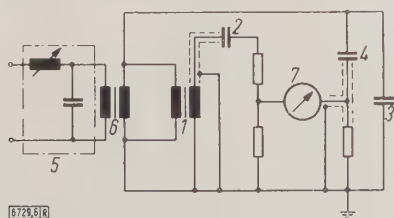


Bild 6. Abgewandelte Scheringbrücke mit Vibrationsgalvanometer oder Kathodenstrahl-Oszillograph als Nullindikator.

- 1 Spannungswandler
- 2 Niederspannungskondensator
- 3 Kurzschlußkapazität für die Hochfrequenz der Spannungsimpulse
- 4 zu messende Kapazität
- 5 Netzfilter gegen Netzbereichswingungen
- 6 Netztransformator

Spannungswandler 1 und einem für Niederspannung geeigneten Kondensator 2 bestehende Einheit ersetzt wird, deren Gesamtschaltung in Bild 6 zu sehen ist. Die Kapazität des Kondensators 3, die gegenüber der Kapazität 4 des Probestückes groß ist, verhindert, daß die Hochfrequenz der Impulse über die Koppelkapazitäten des Spannungswandlers 1 auf den anderen Zweig der Brücke gelangt. Die Zeitkonstante der Impulsentladung wird ebenfalls durch diesen Kondensator 3 definiert.

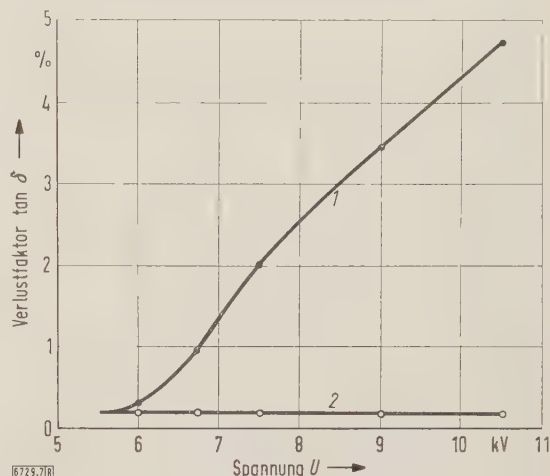


Bild 7. Verlustfaktoren zweier Polystyrolplatten mit Luftspalt, abhängig von der Prüfspannung.

- 1 Gesamtverlustfaktor (mit Galvanometer gemessen)
- 2 Grundverlustfaktor (mit Oszillograph gemessen)

Die für die Speisung der Brückenschaltung benutzte Netzspannung hat viele nicht zu vernachlässigende Oberschwingungen, die den oszillographischen Abgleich erschweren würden. Daher muß die Brücke mit einer ober-schwingungsfreien Spannung gespeist werden, was durch den Einbau eines Resonanzkreises 5 in die Zuleitung der Brücke erreicht wird.

Nachfolgend werden einige Versuchsergebnisse beschrieben. In Bild 7 sind die Kurven des Verlustfaktors $\tan \delta$

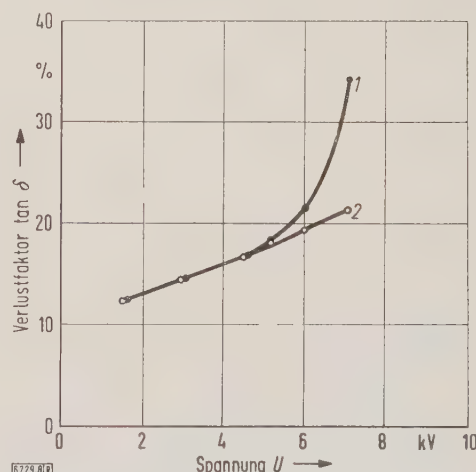


Bild 8. Verlustfaktoren einer leeren Alterungszelle, abhängig von der Prüfspannung.

- 1 Gesamtverlustfaktor (mit Galvanometer gemessen)
- 2 Grundverlustfaktor (mit Oszillograph gemessen)

eines Prüflings dargestellt, der aus zwei Polystyrolplatten und einem Luftspalt besteht. Die Darstellung des Meßergebnisses — der Abgleich geschah mit einem Kathodenstrahl-Oszillographen — zeigt, daß der Verlustfaktor $\tan \delta$ mit der Spannung konstant ist. Demgegenüber zeigt die Darstellung des mit dem Vibrationsgalvanometer bestimmten Verlustfaktors $\tan \delta$ ein Ansteigen, sobald die angelegte Spannung höher als 6 kV wird.

Bild 8 zeigt das Meßergebnis, das an Isolierplatten in einer Alterungszelle, die aus zwei Glasplatten und einem

Luftpalt für den Isolierstoff besteht, gewonnen wurde. Der mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen gemessene Verlustfaktor $\tan \delta$ entspricht den Grundverlusten (Kurve 2)

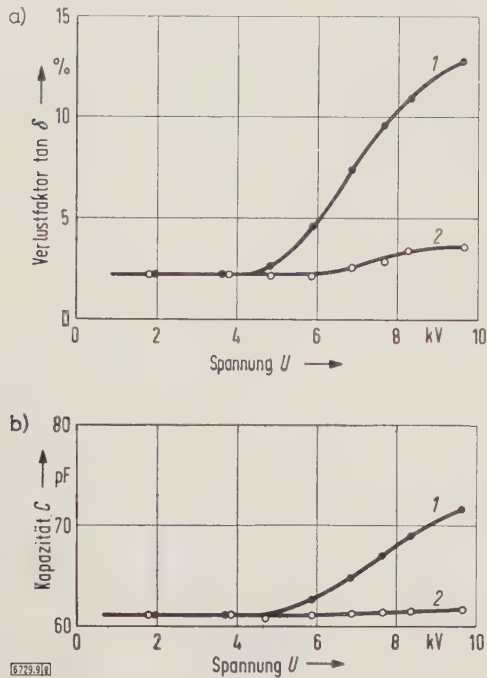


Bild 9. Verlustfaktoren und Kapazitäten eines Generatorstabelementes für 5,5 kV Spannung, abhängig von der Prüfspannung.

a) Verlustfaktoren, b) Kapazitäten
1 mit Oszillograph gemessen 2 mit Galvanometer gemessen

und die $\tan \delta$ entsprechenden Gesamtverluste sind mit dem Vibrationsgalvanometer gemessen (Kurve 1).

In Bild 9 sind die Verlustfaktoren $\tan \delta$ und Kapazitäten (4 in Bild 6) einer etwa 12 cm² großen Oberfläche eines Generatorstabes, abhängig von der angelegten Spannung, aufgetragen. Entsprechend den zwei verschiedenen Nullindikatoren zum Abstimmen wurden auch zwei verschiedene Kurven erhalten.

Bemerkungen

Die auf diese Weise bestimmte Verlustleistung ist nicht gleich der Zerstörungsenergie für den Isolierstoff. Die Leistung wird zum großen Teil als Ionenbombardierung in den Isolierstoff eingebracht. Der Rest wird durch Molekülstöße in Wärme umgesetzt und durch chemische Reaktion des Isolierstoffes und der vom Lichtbogen beheizten und ionisierten Hohlraumgase verbraucht.

Es gibt nur wenige Möglichkeiten, den schädlichen Bruchteil der Verlustleistung kennenzulernen. Jones [2] ist es gelungen, den schädlichen Teil der Leistung für den einfachen Fall eines Lichtbogens zwischen zwei Elektroden einer Zündkerze zu bestimmen, bei dem 11 % der Leistung als Ionisationsverlust auf die beiden Elektroden einer Kerze entfallen. Man kann annehmen, daß dieser schädliche Leistungsanteil unter bestimmten Temperatur- und Druckverhältnissen bei gleichen geometrischen Verhältnissen konstant ist, was eine Vergleichsmessung des Zerstörungsgrades ermöglicht.

Das beschriebene Verfahren wird seit mehr als einem Jahr zum Beobachten des beschleunigten Alterns von Generatorstab-Prüflingen angewendet. Während der Alterung konnte man an einigen Prüflingen eine Verdreifachung der Verluste durch Ionisation bemerken. Nach dem Öffnen dieser Stäbe wurde festgestellt, daß die innere Zerstörung des Isolierstoffes um so höher war, je höher die Ionisationsverluste waren.

Zusammenfassung

Neben der Aufzählung der verschiedenen Verlustarten, die in einem Isolierstoff bei höheren Spannungen auftreten können, werden die Ansprechempfindlichkeiten der verwendeten Nullindikatoren bei sinusförmigen und mit Oberschwingungen behafteten Spannungen behandelt. Die Schaltung einer abgeänderten Scheringmeßbrücke wird erläutert, und einige Versuchsergebnisse werden mitgeteilt und graphisch dargestellt.

Schrifttum

- [1] Macfarlane, G. G.: On the energy-spectrum of an almost periodic succession of pulses. Proc. Instn. Radio Eng. Bd. 37 (1949) S. 1139 bis 1143.
- [2] Llewellyn, J. F.: Electrode erosion by spark discharges. Brit. J. appl. Phys. Bd. 1 (1950) S. 60–65.

Lichtbogenwanderung an runden Stäben

Von Izzet Gönenç, Istanbul/Türkei*)

DK 537.523.5 : 538.691

Die bis jetzt gegebenen Erklärungen über die Geschwindigkeit und den Mechanismus der Lichtbogenwanderung — insbesondere zwischen zwei waagrecht angeordneten Schienen — sind nach Ansicht des Verfassers noch nicht als befriedigend anzusehen. Zu diesen Fragen sollen in dieser Arbeit einige Anregungen gegeben werden. Die über den Mechanismus der Lichtbogenwanderung vom Verfasser vorgenommenen Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen.

Heutiger Stand der Untersuchungen

Grundsätzliche Untersuchungen über die magnetische Ablenkung von Lichtbögen bei Atmosphärendruck sind zuerst von Stolt [1] durchgeführt worden. Der Lichtbogen wurde zwischen Ringelectroden durch ein Magnetfeld zum Rotieren gebracht. Die Auswertung der Versuche, die ausschließlich mit Kupferelectroden ausgeführt wurden, ergab, daß die Rotationsgeschwindigkeit der magnetischen Feldstärke und der Stromstärke proportional ist, jedoch nicht von der Lichtbogenlänge abhängt. Später wurden die Untersuchungen auf andere Metalle (z. B. Silber, Gold, Aluminium) und Kohlenstoff sowie deren Kombinationen ausgedehnt. Dabei fand man bei größeren Stromstärken ebenfalls eine Proportionalität zwischen der Rotationsgeschwindigkeit des Lichtbogens und der Lichtbogen-Stromstärke, während bei geringeren Stromstärken dies nicht zutrifft. Ferner wurde festgestellt, daß die Rotationsgeschwindigkeit fast unabhängig vom Werkstoff der

Kathode ist, daß also ein Einfluß des Elektrodenwerkstoffs nur bei der Anode besteht, und daß die Rotationsgeschwindigkeit bei Kupfer vom Elektrodenabstand nicht beeinflusst wird, dagegen bei Silber mit der Bogenlänge abnimmt. Eine genaue Proportionalität der Rotationsgeschwindigkeit mit dem Magnetfeld ist bei den meisten Kombinationen nicht gegeben.

Die Untersuchungen wurden seinerzeit bei kleineren Strömen (bis zu etwa 12 A) durchgeführt, wobei die Länge der Lichtbögen nur einige Millimeter (bis etwa 7 mm) betrug. Man hat dabei Wanderungsgeschwindigkeiten bis zu 18 m/s gemessen.

Ramberg [2] hat in seiner Arbeit die Abreißgeschwindigkeit des Kathodenfleckes für verschiedene Metalle untersucht. Er wendet sich gegen die thermische Bogentheorie und stellt fest, daß diese bei Lichtbögen zwischen Metallen, wie Kupfer und Quecksilber, nicht gültig sein kann. Er teilt die untersuchten Elemente nach ihrer Elektronenemission bei ihrer Siedetemperatur in zwei Gruppen ein, nämlich einerseits die „Kupfergruppe“ und solche Metalle, die sich wie Kupfer verhalten (Quecksilber, Gold,

*) Dipl.-Ing. I. Gönenç ist Dozent an der Elektrotechnischen Fakultät der Technischen Universität Istanbul/Türkei.

Silber) und andererseits die „Kohlegruppe“ und solche Stoffe, die sich wie Kohle verhalten (wahrscheinlich Wolfram, vielleicht auch Kalzium und Magnesium). Die Kupfergruppe zeigt eine große Beweglichkeit des Kathodenfleckes; im Gegensatz hierzu weist die Kohlegruppe eine geringere Beweglichkeit auf. Neben diesen Grenzfällen gibt es Metalle (z. B. Messing, Eisen, Aluminium, Zink, Nickel, Blei), die eine Zwischenstellung einnehmen.

Burghoff [3] hat dagegen die Verhältnisse der Lichtbogenwanderung bei höheren Stromstärken (bis über 100 A), wie sie für die Stromrichter in Frage kommen, sowie bei größeren Elektrodenabständen (20 bis 50 mm) für verschiedene Metalle (z. B. Messing, Silber, Aluminium, Kupfer und Chromnickel) untersucht und Wanderungsgeschwindigkeiten von etwa 40 m/s gefunden. Der Lichtbogen wurde durch ein gleichstromerregtes Magnetfeld abgelenkt. Burghoff fand, daß die Geschwindigkeit des Lichtbogens von der Oberflächenbeschaffenheit der Elektroden abhängt und daß deren mechanische Struktur bei verschiedenen Metallen je nach der Polarität unterschiedlich ist. Bei hochglanzpolierten Elektroden stellte er fest, daß der anodische Fußpunkt schneller wandert als der kathodische. Er teilt dann die Metalle, die längere Zeit in Betrieb gewesen sind, nach ihren Geschwindigkeitszuständen in drei Gruppen ein.

1. Messing und Silbergruppe:

Die Geschwindigkeit des Anodenfußpunktes ist immer größer als die des Kathodenfußpunktes.

2. Aluminium und Chromnickelgruppe:

Beide Fußpunkte haben im Mittel die gleiche Geschwindigkeit.

3. Kupfergruppe:

Bei kleiner Induktion (bis etwa 300 G) überwiegt die Geschwindigkeit des Kathodenfußpunktes. Bei Vergrößern der Induktion streben beide Fußpunktgeschwindigkeiten gemeinsamen Werten zu.

Burghoff kommt zu dem Ergebnis, daß die Wanderungsgeschwindigkeit des Lichtbogens bei verschiedenen Elektrodenabständen, aber sonst gleichen Betriebsverhältnissen für die Elektrodenabstände von 30 bis 50 mm praktisch gleich ist.

In den obenerwähnten Untersuchungen wurde der Lichtbogen durch fremde Magnetfelder zum Wandern gebracht. Es ist bekannt, daß der Lichtbogen auch durch das eigene Magnetfeld der Stromschleife wandert. In Schaltanlagen ist bereits seit langer Zeit beobachtet worden, daß der Lichtbogen längs der Schienen läuft; es liegen jedoch hierüber nur wenige grundsätzliche Untersuchungen vor. Um die Verhältnisse in Schaltanlagen aufzuklären, hat Freiburger [4] Versuche durchgeführt, bei denen er Kurzschlußlichtbögen hoher Leistung (von 1 bis 30 kA) und eine treibende Spannung von 6 kV benutzte. Nach Vergrößern des Abstandes — vom kleinsten der VDE-Reihenspannung zugeordneten Mindestabstand bis ungefähr zum Dreifachen dieses Wertes — stellte er fest, daß in diesem Bereich eine Veränderung des Abstandes auf die Wanderungsgeschwindigkeit nur insofern wirksam ist, als durch sie eine Änderung der Feldstärke eintritt. Ferner fand er, daß die Wanderungsgeschwindigkeit nicht von der Spannung, sondern vom Strom abhängt.

Zur Aufklärung der Frage, ob bei Lichtbögen großer Länge die elektrodynamische Kraft oder der thermische Auftrieb überwiegen, hat Hochrainer [5] theoretische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt und kam zu dem Ergebnis, daß bei senkrecht aufgestellten und von oben gespeisten Elektroden bei kleinem Strom und großem Lichtbogen auch der thermische Auftrieb in der Mitte des Lichtbogens die elektrodynamische Kraft überwiegen kann, so daß der mittlere Teil des Lichtbogens aufsteigt, während der Teil in der Nähe der Leiter zusammen mit den Fußpunkten nach unten getrieben wird.

Ziel der vorliegenden Arbeit

Aus den bis jetzt vorliegenden Untersuchungen geht hervor, daß die meisten grundsätzlichen Arbeiten über die Wanderungsgeschwindigkeit des Lichtbogens mehr mit kleinen Strömen und ausschließlich bei fremderregten Magnetfeldern durchgeführt worden sind. Freibergers Untersuchungen, bei denen die Lichtbogenwanderung durch das eigene Magnetfeld der Stromschleife zustande kam, geben aber keine reproduzierbaren Meßwerte bezüglich der Stromstärke, Elektrodenabstände, Elektrodendurchmesser und schließlich Elektrodenwerkstoffe. Ferner wurde bis jetzt keine formelle Beziehung für die Wanderungsgeschwindigkeit eines durch sein eigenes Magnetfeld wandernden Lichtbogens aufgestellt, welche die praktisch in Frage kommenden obengenannten Varianten enthält. Die von Engel und Steenbeck [6] angegebene Formel bedarf in dieser Hinsicht einer Erweiterung, die unter anderem das Ziel der Untersuchungen war.

Messung der Wanderungsgeschwindigkeit

Bisher wurde die Wanderungsgeschwindigkeit des Lichtbogens großer Stromstärke hauptsächlich auf photographischem Wege gemessen. Obwohl dieses Verfahren neben der Geschwindigkeitsmessung auch über die Wanderungsvorgänge manche Aufschlüsse geben kann, so könnten doch beim Durchführen der Versuche Fälle eintreten, in denen dieses Verfahren versagen oder zumindest fehlerhafte Ergebnisse bringen würde. Aus diesem Grunde wurde ein neues Verfahren zum Messen der Geschwindigkeit der Lichtbogenwanderung gesucht. Unter den ausprobierten Verfahren scheint das nachstehend beschriebene am zweckmäßigsten zu sein.

Die Zeit, in welcher der Lichtbogen eine bestimmte Strecke auf den Elektroden zurücklegt, wird mit Hilfe eines Schleifenszillographen durch Benutzen der Netzfrequenz als Zeitmaßstab festgestellt. Zwei Fehlerquellen waren insbesondere zu beseitigen. Zunächst durfte der Lichtbogen bei seiner Wanderung nicht irgendwie durch die Meßanordnung beeinflusst werden, und dann sollte der abklingende Kurzschlußstrom des Lichtbogens innerhalb der Laufstrecke möglichst die ersten Stromspitzen nicht enthalten, d. h. im Mittel einen gleichmäßigen Wert haben, damit man beim Auswerten der Meßergebnisse eindeutige Ergebnisse erhält.

Auf Grund dieser Überlegungen wurde die in Bild 1 schematisch dargestellte Meßanordnung entwickelt. Zwei Meßschleifen 5 und 6 des Sillographen wurden mit je

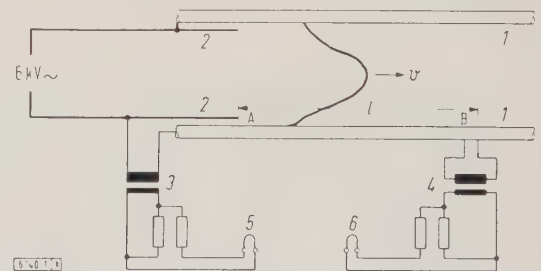


Bild 1. Anordnung zum Messen der Wanderungsgeschwindigkeit des Lichtbogens.

1 Elektroden 3, 4 Stromwandler 1 Laufstrecke
2 Schellen 5, 6 Sillographenschleifen

einem Stromwandler 3 und 4 am Anfang und am Ende der Laufstrecke A—B verbunden. Der Lichtbogen wurde an den Schellen 2, die über den Elektroden 1 isoliert angebracht sind, durch einen dünnen Draht gezündet. Am Anfang der Wanderung, solange der Lichtbogen über die Schellen läuft, ist die Meßschleife 5 stromlos. Während dieser Zeit klingen die ersten Stromspitzen ab. Erst wenn der Lichtbogen auf die Elektrode an dem Punkt A überspringt, beginnt die Meßschleife 5 zu schreiben. Sobald der Lichtbogen zum Punkt B gelangt, fängt auch die Schleife 6 an zu schreiben.

Man erhält somit ein Oszillogramm, aus dem die mittlere Stromstärke und Laufzeit t_w des Lichtbogens abzulesen sind (Bild 2).

Durchführung der Versuche

Den Versuchen lag die Aufgabe zugrunde, die Wanderungsgeschwindigkeit des Lichtbogens an runden Elektroden experimentell festzustellen, ihre Abhängigkeit vom Ab-

ten, so daß die Wanderungsgeschwindigkeiten kleiner werden. Diese Erscheinung ist bei größeren Geschwindigkeiten nicht von Bedeutung; sie tritt besonders bei kleinen Geschwindigkeiten in der Nähe der „Klebegeschwindigkeit“ auf, hat aber auf den weiteren Verlauf der Geschwindigkeitskurven keinen nennenswerten Einfluß.

Ferner wurde festgestellt, daß bei größeren Strömen und bei längeren Laufstrecken Biegungen der Elektroden auftraten, die wiederum zu falschen Meßergebnissen führten. Um dies zu verhindern, schützte man die Elektroden von außen her. Hierdurch blieb dann aber der Lichtbogen an diesen Stellen stehen. Daher mußte die Laufstrecke des Lichtbogens auf kleinere Längen von 40 bis 100 cm beschränkt werden.

Bei der Zeitmessung zeigte sich, daß die Größe des mit der Primärwicklung des Wandlers 4 abgegriffenen Elektrodenstückes am Punkt B (Bild 1) auch einen gewissen Einfluß auf die Lichtbogenwanderung hat. Bei größeren Abgriffslängen trachtete der Lichtbogen danach, an diesem Stück infolge zweiseitiger Speisung stehenzubleiben, wodurch unerwünschte Verschmorungen an den Elektroden und ein gewisses Flattern in den Oszillogrammen entstanden, was ebenfalls zu ungenauen Meßergebnissen führte. Daher wurde die Länge des Abgriffstückes so klein wie möglich — entsprechend der Empfindlichkeit der Meßschleife — gewählt. Am günstigsten erwies sich ein Abstand von der Größe der Elektrodendurchmesser.

Als Stromquelle diente ein von einem Drehstrom-Asynchronmotor angetriebener kurzschlußfester Synchrongenerator mit einer Leistung von 300 kVA und einer Spannung von 6 kV.

Versuchsergebnisse

In Bild 3 ist die Wanderungsgeschwindigkeit des Lichtbogens bei einem Elektrodendurchmesser d von 5 mm bei verschiedenen Elektrodenabständen a , abhängig von der



stand, Durchmesser, Strom und Werkstoff der Elektroden zu bestimmen und diese Varianten in einer Formel theoretisch zu erfassen.

Die Versuche wurden an parallel und waagrecht liegenden Kupfer-, Eisen- und Aluminiumelektroden mit 5, 10, 20 und 40 mm Dmr. sowie bei Elektrodenabständen von 20 bis 200 mm bei einer treibenden Spannung von 6 kV durchgeführt. Es wurden absichtlich waagrecht liegende Elektroden gewählt, weil der Einfluß des thermischen Auftriebes möglichst ausgeschlossen werden sollte.

Es wurde festgestellt, daß die Wanderungsgeschwindigkeit bei schon benutzten und bei noch unbenutzten glatten Elektroden verschieden groß war. Dies machte sich besonders bei kleinen Geschwindigkeiten infolge der Schmorstellen bemerkbar. Der Lichtbogen wird von Schmorstellen je nach ihrer Größe und Form mehr oder weniger aufgehal-

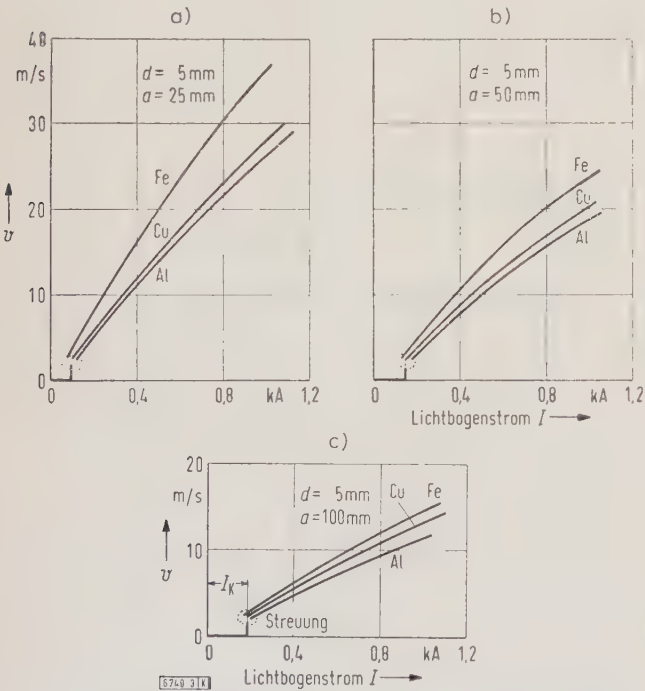
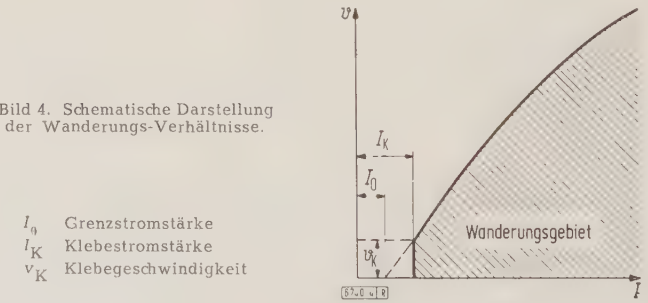


Bild 3. Wanderungsgeschwindigkeit v , abhängig von der Stromstärke I des Lichtbogens, bei verschiedenen Werkstoffen und Elektrodenabständen a .

Teilbild	Werkstoff-Faktor m		
	Kupfer	Eisen	Aluminium
a	1	1,33	0,95
b	1	1,20	0,73
c	1	1,13	0,9



Stromstärke, dargestellt. Besonders bei kleinen Elektrodenabständen scheint keine Proportionalität zwischen der Geschwindigkeit und der Stromstärke zu bestehen. Aus den Kurven geht hervor, daß die Wanderungsgeschwindigkeit bei Eisen im allgemeinen größer ist als bei Kupfer und Aluminium. Bei einer gegebenen Anordnung bleiben die Verhältnisse der Geschwindigkeiten der genannten Werkstoffe nahezu konstant, was auf das Bestehen einer Gesetzmäßigkeit zwischen der Geschwindigkeit und der Stromstärke hinweist.

Aus den Kurven ist das Geschwindigkeitsverhältnis mit dem „Werkstoff-Faktor“ m ermittelt worden, der bei einer gegebenen Anordnung für Kupfer mit 1 angenommen wurde. Aus den ermittelten Werten von m geht hervor, daß das Eisen um so mehr Einfluß auf die Wanderungsgeschwindigkeit ausübt, je kleiner der Elektrodenabstand wird; dies trifft auch bei Aluminium zu.

Die Lichtbogenwanderung fängt, wie die Versuche zeigen, bei einer bestimmten Stromstärke sprunghaft an. Diese Erscheinung sei mit „Klebeerscheinung“, und die zugehörige Stromstärke und Geschwindigkeit seien mit „Klebestromstärke“ I_K und „Klebegeschwindigkeit“ v_K bezeichnet. Unterhalb der Klebestromstärke findet keine ausgesprochene Wanderung statt; es kommen vielmehr ge-

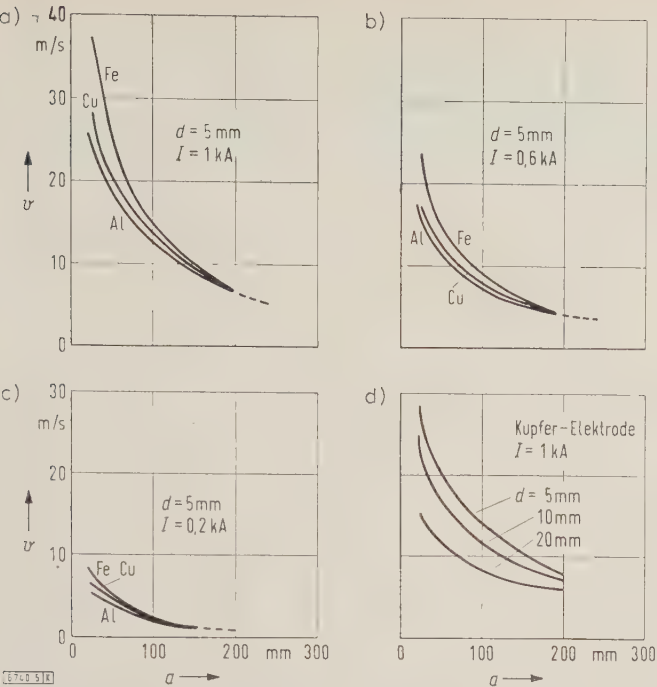


Bild 5. Wanderungsgeschwindigkeit v , abhängig vom Elektrodenabstand a , bei verschiedenen Werkstoffen, Elektrodenröhrdurchmessern d und Stromstärken. Erläuterungen im Text.

legentliche Sprünge vor, die aber nicht als Wanderung zu bezeichnen sind. Die Klebestromstärke ändert sich bei Eisen-, Kupfer- und Aluminium-Elektroden für einen Bereich der Elektrodenabstände von 25 bis 200 mm, bei Elektrodenröhrdurchmessern von 5, 10, 20 und 40 mm etwa von 50 bis 200 A, während die Klebegeschwindigkeit etwa zwischen 1 und 2 m/s liegt.

Die Extrapolation der Kurven zeigt, daß diese nicht durch den Nullpunkt gehen. Sie schneiden die Stromabszisse bei einer bestimmten Stromstärke, der „Grenzstromstärke“ I_0 . Diese Verhältnisse sind in Bild 4 schematisch dargestellt. Insbesondere soll das Wanderungsgebiet oberhalb der Klebestromstärke betrachtet werden.

In Bild 5 ist die Wanderungsgeschwindigkeit, abhängig vom Elektrodenabstand a , dargestellt. Bei größeren Elektrodenabständen nähern sich die Wanderungsgeschwindigkeiten bei Eisen, Kupfer und Aluminium einem gemeinsamen Wert. Der Abstand zwischen den Kurven bei verschiedenen Werkstoffen ist um so größer, je kleiner der Elektrodenabstand und je größer die Stromstärke sind.

In Bild 6 ist die Wanderungsgeschwindigkeit, abhängig vom Elektrodenröhrdurchmesser, dargestellt. Die Versuche wur-

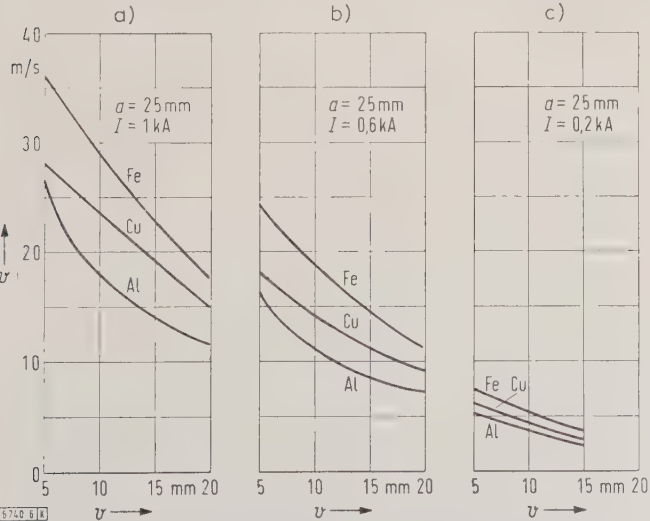


Bild 6. Wanderungsgeschwindigkeit v , abhängig vom Elektrodenröhrdurchmesser d , bei verschiedenen Werkstoffen und Stromstärken. Erläuterungen im Text.

den nur bis zu einem Elektrodenröhrdurchmesser von 20 mm durchgeführt. Bei Elektroden mit 40 mm Dmr. kam es nicht zu regelmäßigen Wanderungen; es traten vielmehr Sprünge auf. Die Lichtbogen wanderten, wie aus Bild 10 c zu ersehen ist, nur einige Zentimeter. Dies war ausschließlich bei Kupferelektroden der Fall. In diesen Fällen erhält man keine reproduzierbaren Meßwerte. Diese Verhältnisse sollen in der vorliegenden Arbeit daher außer acht gelassen werden.

Berechnung der Wanderungsgeschwindigkeit des Lichtbogens

In folgendem soll versucht werden, die Wanderungsgeschwindigkeit des Lichtbogens mit Hilfe der Strömungslehre und der magnetischen Kräfte zu berechnen. Der Lichtbogen wandert offensichtlich — der zeitlichen Änderung des Wechselstromes entsprechend — mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. Im Gebiet unterhalb der Klebestromstärke sollte eigentlich, mit Ausnahme von gelegentlichen Sprüngen, keine wahre Wanderung vorkommen. Der Fußpunkt des Lichtbogens müßte dann in diesen Zeitabständen für eine Weile stehenbleiben, bis die Klebestromstärke erreicht wird, während die Lichtbogensäule selbst sich weiter bewegt.

Die Berechnung der Wanderungsgeschwindigkeit einer Lichtbogensäule ist, wie Engel und Steenbeck [6] andeuten, nur angenähert möglich. Dies kommt daher, daß man viele Faktoren, die direkt oder indirekt auf die Wanderung wirken, nicht bei der Berechnung berücksichtigen kann und daß man aus diesem Grunde manche vereinfachende Annahmen machen muß.

Eine Näherungsformel für die Wanderungsgeschwindigkeit erhält man, wenn man die Bogensäule als einen heißen Gasstab auffaßt, auf den je Längeneinheit die elektrodynamische Kraft wirkt und dessen Bewegungsgeschwindigkeit im stationären Fall durch die Reibung des heißen Gasstabes im umgebenden kalten Gas begrenzt wird. Der Widerstand, den die Bewegung eines zylindrischen Stabes in einem ruhenden Gas erfährt, ist aus den Gesetzen der Strömungslehre bekannt. Wegen der großen Relativgeschwindigkeit muß man hier mit dem Reibungswiderstand für turbulente Strömung rechnen. Angenommen sei, daß die Lichtbogensäule sich wie ein massiver Stab — entsprechend der Stromänderung — bewegt. Sowohl die vom Verfasser an wandernden Lichtbögen gewonnenen Beobachtungen als auch die Aufnahmen der wandernden Lichtbögen, die von Freiburger und Burghoff zur Bestimmung der Wanderungsgeschwindigkeit gemacht wurden, zeigen, daß der Lichtbogen während der Wanderung innerhalb des größten Teiles der Laufstrecke seine Form ungefähr beibehält. Man kann daher die Wanderung als eine Parallelverschiebung des Lichtbogens auffassen.

Ist F' die mittlere Kraft, die auf die Längeneinheit der Lichtbogensäule wirkt, und W' der Strömungswiderstand des Lichtbogens in Luft je Längeneinheit der Säule, so ist im stationären Fall der Geschwindigkeit

$$W' = F', \tag{1}$$

Die auf den Lichtbogen wirkende elektrodynamische Kraft je Längeneinheit ist durch die magnetische Induktion \mathfrak{B} des Mediums zwischen den Säulen und durch den Säulenstrom \mathfrak{I} gegeben (Bild 7). Die Kraft F'_x an der Stelle x ist somit nach [7]

$$\overline{F'_x} = B_x I_x = \frac{\mu_0 \mu_r}{4 \pi} I^2 \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{c-x} \right). \tag{2}$$

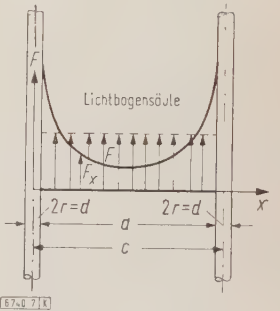


Bild 7. Zur Berechnung der Wanderungsgeschwindigkeit.

Die treibende mittlere Gesamtkraft je Längeneinheit erhält man durch Integration zu

$$F' = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} I^2 \frac{1}{a} \ln \frac{2a+d}{d}, \quad (3)$$

dabei sind a der Elektrodenabstand und
 b der Elektrodendurchmesser.

Der Strömungswiderstand W' für turbulente Strömung je Längeneinheit der Säule ist

$$W' = \lambda D \delta v^2, \quad (4)$$

wobei

λ die Widerstandszahl für konstante Reynoldszahl,

D der Durchmesser der Gassäule,

δ die Dichte der Luft,

v die Geschwindigkeit des Lichtbogens

bedeuten. Aus Gl. (3) und (4) erhält man mit den gegebenen konstruktiven und bekannten physikalischen Größen, außer dem Durchmesser D der Gassäule, für die Wanderungsgeschwindigkeit des Lichtbogens

$$\frac{v}{\text{cm/s}} = k(I/A) (D/\text{cm})^{-1/2} \quad (5)$$

Würde der Durchmesser D der Gassäule konstant bleiben, so entspricht in Bild 8 die Kurve 1 der Gl. (5). Bleibt da-

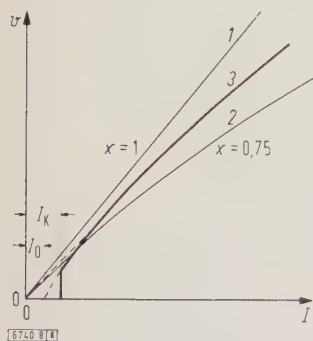


Bild 8. Wanderungsgeschwindigkeit v , abhängig vom Strom I , für verschiedene Werte von x .

Erläuterungen im Text.

gegen die Stromdichte S im Lichtbogen konstant, so erhält man mit $S = I/(\pi D^2/4)$ die Laufgeschwindigkeit des Lichtbogens aus Gl. (5) zu

$$\frac{v}{\text{cm/s}} = k_1(I/A)^{0,75}, \quad (6)$$

wobei in Gl. (6) bis (10) für I die Stromstärke in Ampere einzusetzen ist. Die graphische Darstellung der Gl. (6) ist als Kurve 2 in Bild 8 eingetragen. Für den Durchmesser D der Gassäule liegt der Exponent des Zahlenwertes der Stromstärke I zwischen 1 und 0,75 (Kurve 3). Da ganz allgemein der Durchmesser der Gassäule

$$\frac{D}{\text{cm}} = k_2(I/A)^{\sigma} \quad (7)$$

ist, so erhält man, indem man Gl. (7) in Gl. (5) einsetzt, für die Geschwindigkeit

$$\frac{v}{\text{cm/s}} = k_3(I/A)^{1-\sigma/2} = k_3(I/A). \quad (8)$$

Der unbekannte Exponent x muß aus den v -Kurven bestimmt werden. Er dürfte nach der Voraussetzung zwischen 1 und 0,75 liegen.

Aus den Meßergebnissen geht weiter hervor, daß die Wanderungsgeschwindigkeiten des Lichtbogens bei Eisen-, Kupfer- und Aluminium-Elektroden für eine bestimmte Elektrodenanordnung etwa in bestimmten Verhältnissen zueinander stehen. Daher braucht der Exponent x nur für einen Fall bestimmt zu werden. Für Kupfer wurde der Wert zu $x = 0,85$ bestimmt. Berücksichtigt man das Geschwindigkeitsverhältnis mit dem Werkstoff-Faktor m , der für Kupfer bei der jeweils gegebenen Anordnung mit 1 angenommen wurde, so erhält man für die tatsächliche Geschwindigkeit die Beziehung:

$$\frac{v}{\text{cm/s}} = m k_4(I/A)^{0,85} \quad (9)$$

mit

$$m_{\text{Cu}} = 1 \quad \text{für Kupfer,}$$

$$m_{\text{Fe}} = 1,33 \quad \text{für Eisen}$$

$$m_{\text{Al}} = 0,95 \quad \text{für Aluminium}$$

für einen Elektrodendurchmesser $d = 5$ mm bei einem lichten Elektrodenabstand $a = 25$ mm. Diese Beziehung gilt, wie oben erwähnt, nur für das Wanderungsgebiet $v > v_K$. Eine Nachprüfung zeigte, daß eine gewisse Übereinstimmung zwischen der Berechnung und der Messung auch bei anderen Elektrodenanordnungen (natürlich unter Berücksichtigung des Werkstoff-Faktors) besteht (Bild 12 a).

Beziehung zwischen dem Säulendurchmesser und der Säulenstromstärke des wandernden Lichtbogens

An Hand der obigen Ableitung könnte man daran denken, eine Beziehung zwischen dem Säulendurchmesser und der Säulenstromstärke bei einem wandernden oder Konvektion ausgesetzten Lichtbogen zu erhalten. Durch Gleichsetzen der Gl. (5) und (9)

$$\frac{v}{\text{cm/s}} = k(I/A) (D/\text{cm})^{-1/2} = m k_4 (I/A)^{0,85}$$

erhält man für den Durchmesser D der Gassäule des Lichtbogens

$$\frac{D}{\text{cm}} = k_5(I/A)^{0,3}. \quad (10)$$

Die Richtigkeit dieser Beziehung muß natürlich noch experimentell untersucht werden. Sie gilt nach der obigen Annahme nur für das Wanderungsgebiet $v > v_K$.

Es ist auch möglich, auf diese Weise eine Beziehung zwischen dem Säulendurchmesser und der Wanderungsgeschwindigkeit (Windgeschwindigkeit) zu finden.

Mechanismus der Lichtbogenwanderung

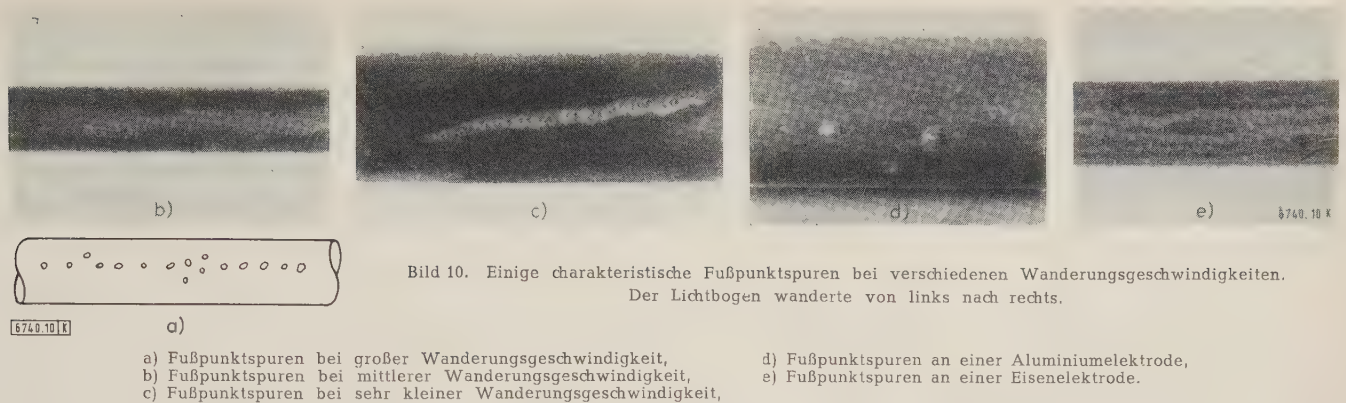
Der Mechanismus der Lichtbogenwanderung ist noch nicht in allen Einzelheiten geklärt. *Burghoff* geht auf diese Frage ein und gibt folgende zusammengefaßte Erklärung für die Anode: Die außerhalb des Lichtbogenkanals befindlichen Elektronen bewegen sich unter dem Einfluß des elektrischen Feldes auf die Anode zu und bilden unter dauerndem Nachschub von Elektronen aus dem Gaskanal heraus einen Elektronenkanal. Sobald dieser Elektronenkanal die unmittelbare Nähe der Anode erreicht hat, tritt hier eine hohe Feldstärke (Anodenfall) auf, wodurch eine Erzeugung von positiven Ionen hervorgerufen wird. Diese positiven Ionen wandern nun in entgegengesetzter Richtung, neutralisieren den ursprünglichen Elektronenkanal und geben ihm Lichtbogencharakter. Darauf kann der neue Fußpunkt den gesamten Stromtransport übernehmen und der bisherige Lichtbogenflußpunkt erlöschen.

Burghoff weist aber gleichzeitig darauf hin, daß eine analoge Betrachtung für die Lichtbogengabelung an der Kathode nicht zu einem befriedigenden Ergebnis führt. Er nimmt an, daß der Nebenlichtbogen durch die zufällig aus dem Gaskanal austretenden Elektronen hervorgerufen wird. Dies ist aber fraglich, da bei einem Lichtbogen großer Stromstärke das magnetische Eigenfeld die Diffusion überwiegen kann, so daß die Elektronen nach innen gezogen werden.

Durch Überlegungen kommt man zu dem Ergebnis, daß der Lichtbogen auf jeden Fall entweder durch das Entstehen eines Nebenlichtbogens wandert oder durch das Berühren der eigentlichen Säule mit der Elektrode und durch gleichzeitiges Löschen des bisherigen Fußpunktes, der jeweils von dem Nebenlichtbogen oder der Elektrode kurzgeschlossen wird.

Die Frage, wie ein Nebenlichtbogen entsteht, wie ein Berühren der Säule mit der Elektrode zustande kommt und wie das Löschen des bisherigen Säulenstieles vor sich geht, soll an Hand der vorliegenden Beobachtungen erklärt werden.

Die Ursache des Nebenlichtbogens an der Kathode ist entweder in der thermischen Elektronenemission oder in



der kalten Feldemission zu suchen. Es gibt Fälle, in denen diese Erscheinungen von der thermischen Bogentheorie nicht erfaßt werden können. Sie bestehen darin, daß der Bogen auf einer Metallelektrode, ohne an einem Punkt stehenzubleiben, mit beträchtlicher Geschwindigkeit frei gleiten kann. Man hat beobachtet, daß der Bogen sich mit einer Geschwindigkeit bewegt, welche die Möglichkeit einer genügenden Erwärmung der Kathode ausschließt. Die Ursache eines Nebenlichtbogens kann auch bei einem Lichtbogen großer Stromstärke in der thermischen Ionisation der Säulenwolke gesucht werden.

Ein Nebenlichtbogen kann also verschiedene Ursachen haben. Hier soll aber auf die physikalischen Entladungsvorgänge nicht näher eingegangen werden, sondern es soll mehr ihr Mechanismus betrachtet werden. Von diesem Standpunkt aus wäre es von Interesse, einige Betrachtungen und Anregungen zu erwähnen, die für die Aufklärung des mechanischen Wanderungsmechanismus des Lichtbogens dienen könnten.

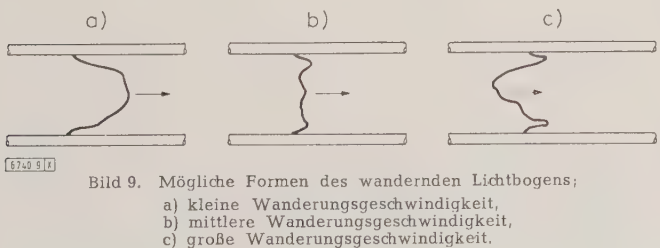
Gestalt der Säule bei verschiedenen Geschwindigkeiten

Nach den Beobachtungen kann ein wandernder Lichtbogen je nach der Höhe der Geschwindigkeit eine Form haben, die in Bild 9 a, b oder c dargestellt ist.

Fußpunktspuren bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Metallen

Bild 10 a bis c zeigt einige charakteristische Fußpunktspuren bei verschiedenen Geschwindigkeiten.

Bei größeren Geschwindigkeiten treten kleinere Brennflecken hauptsächlich in der Wanderungsrichtung auf. Stellenweise kommen sie auch in der Querrichtung vor. Diese Spuren sind ihrer Struktur nach keine Schmorungen, sondern örtliche Überhitzungen. Die Abstände der Spuren voneinander betragen im Mittel 1 bis 3 mm (Bild 10 a). Das Auftreten der Spuren in der Querrichtung der Wande-



lung deutet darauf hin, daß an diesen Stellen wahrscheinlich mehrere Nebenlichtbögen gleichzeitig bestanden. Solche Spuren kommen auch bei kleineren Geschwindigkeiten vor, jedoch sehr selten.

Bei mittleren Geschwindigkeiten treten nadelspitz auslaufende Erhebungen auf, deren Abstände voneinander im Mittel 3 bis 5 mm und deren Höhe etwa 0,5 bis 1 mm betragen. Sie haben eine mittlere Neigung gegen die Elektrode von 60 bis 80° in der Laufrichtung (Bild 10 b).

Bei sehr kleinen Geschwindigkeiten treten größere Schmorungen auf, z. B. bei einer Kupferelektrode von 40 mm Dmr. (Bild 10 c) in Form von aufeinandergeschichteten stumpf auslaufenden Erhebungen (Durchmesser: bis etwa 4 mm und größer; Höhe: bis im Mittel 3 mm). Dagegen treten bei einer Aluminiumelektrode (Bild 10 d) halbkugelförmige Erhebungen und Vertiefungen derselben Größe und Höhe wie bei Kupfer auf.

Die Spuren bei Eiselektroden sind besonders charakteristisch. Wie Bild 10 e zeigt, sind es bandförmige Überhitzungen, die auf einen unmittelbaren Einfluß der Säulen-

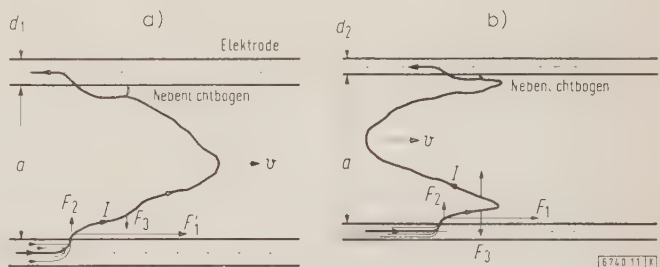


Bild 11. Zwei Formen von Lichtbögen;
a) Lichtbogen bei großem Elektrodendurchmesser und kleiner Geschwindigkeit,
b) Lichtbogen bei kleinem Elektrodendurchmesser und großer Geschwindigkeit.

wolke auf die Elektrode hinweisen. Dies scheint die Folge der magnetischen Anziehung der Säule durch die Eiselektrode zu sein.

Ergänzende Betrachtungen über den Wanderungsmechanismus

Es soll nun versucht werden, an Hand der oben geschilderten Beobachtungen eine Erklärung für den mechanischen Wanderungsmechanismus zu geben. Zu diesem Zweck sollen zwei charakteristische Fälle betrachtet werden, einer mit einer kleineren und der andere mit einer größeren Geschwindigkeit (Bild 11 a und b). Die Strombahn und die auf die Säule wirkenden Kräfte sind eingezeichnet.

Einfluß des Elektrodendurchmessers

Die auf die Längeneinheit des Säulenstieles in unmittelbarer Nähe der Elektrode wirkende treibende Kraft, die von den beiden Elektrodenströmen herrührt, sei mit F'_1 bezeichnet. Sie liegt in der Richtung der Elektrodenachse. Die Bahn des resultierenden Stromes verläuft in Nähe des Fußpunktes, wie in Bild 11 dargestellt, mit einer starken Biegung. Infolge dieses Bahnverlaufes ist außer der Kraft in der Achsenrichtung auch eine Kraft in der Querrichtung der Elektrodenachse vorhanden, die mit F'_2 bezeichnet ist. Diese Kraft trachtet, den Säulenstiel am Fußpunkt in eine Lage quer zur Elektrode zu bringen. Unter dem Einfluß der beiden Kräfte wird der Säulenstiel die Lage der resultierenden Kraft F' einnehmen.

Es ist leicht zu übersehen, daß die Kraft F'_1 bei kleinerem Elektrodendurchmesser größer ist als bei größerem

Elektrodendurchmesser, während für die Kraft F'_2 das Gegenteil der Fall ist. Aus diesem Grunde wird der Säulenstiel bei kleinerem Elektrodendurchmesser zur Elektrode hin mehr abgelenkt als bei größerem Elektrodendurchmesser. Dies kommt daher, weil das Verhältnis der treibenden Kraft F'_1 an der Elektrode zu der treibenden Kraft F'_2 in der Mitte der Säule — bei demselben Elektrodenabstand,

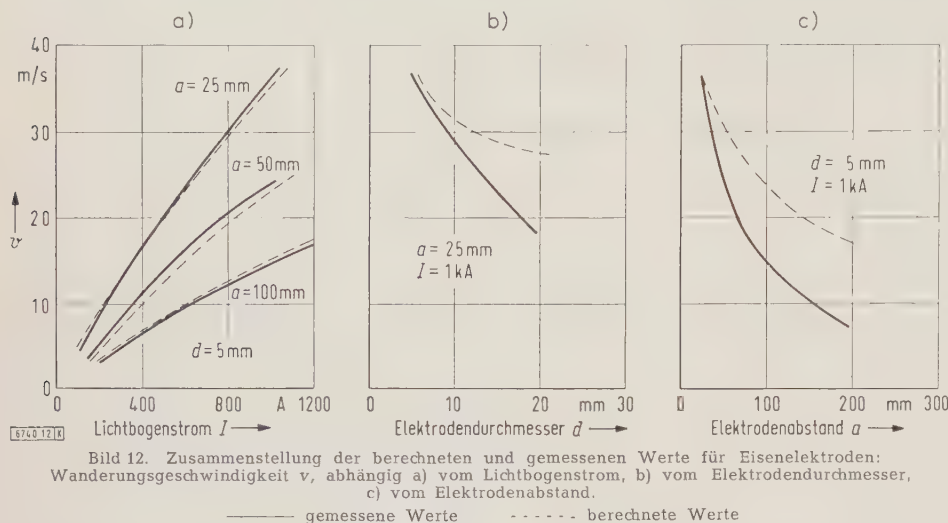


Bild 12. Zusammenstellung der berechneten und gemessenen Werte für Eisenelektroden: Wanderungsgeschwindigkeit v , abhängig a) vom Lichtbogenstrom, b) vom Elektrodendurchmesser, c) vom Elektrodenabstand.

— gemessene Werte — — — — — berechnete Werte

Elektrodenstrom und Werkstoff — im Falle eines kleineren Elektrodendurchmessers viel größer ist als im Falle eines größeren Elektrodendurchmessers. Aus diesem Grunde wird die Säule in der Nähe der Elektrode mehr vorgetrieben als in der Mitte der Säule, wodurch eine Gabelung entsteht.

Auf den Säulenstiel wirkt außer den Kräften F'_1 und F'_2 auch noch eine resultierende Kraft F'_3 , die infolge der Gestalt der Säule durch den Säulenstrom selbst entsteht. Diese Kraft treibt den Säulenstiel zur Elektrode hin, die im Falle b viel größer sein wird als im Falle a.

Es steht fest, daß bei einem Lichtbogen großer Stromstärke die Wanderung durch das Entstehen eines zweiten Fußpunktes in der Laufrichtung zustande kommt. Aus diesen Erwägungen geht ohne weiteres hervor, daß ein zweiter Fußpunkt im Falle b viel eher entstehen wird als im Falle a. Daher wird die Wanderungsgeschwindigkeit im Falle b viel größer. Weil die Aufenthaltszeit des Fußpunktes in diesem Falle viel kürzer ist, werden keine merkbaren Schmorstellen entstehen, was durch die Beobachtungen der Fußpunktspuren bestätigt wird.

Einfluß des Elektrodenwerkstoffes

Im folgenden soll der Einfluß des Elektrodenwerkstoffes auf die Wanderungsgeschwindigkeit des Lichtbogens in Betracht gezogen werden; dies soll aber nicht als eine endgültige Behandlung dieses Themas aufgefaßt werden. Nach den Versuchsergebnissen des Verfassers liegen Wanderungsgeschwindigkeiten bei Eisen-, Kupfer- und Aluminium-Elektroden in der Reihenfolge $v_{Fe} > v_{Cu} > v_{Al}$. Dies steht aber mit dem Ergebnis von *Ramberg* nicht im Einklang.

Obwohl es sich im vorliegenden Fall um einen Wechselstromlichtbogen handelt, können nach Ansicht des Verfassers die Versuchsergebnisse gegenübergestellt werden; denn bei einem Wechselstrombogen kommt ein Wechsel der Polaritätseffekte an den Elektroden vor, wodurch sich eine mittlere Geschwindigkeit ergibt, in der die beiden Polaritätseffekte einbegriffen sind.

Nach der Ansicht des Verfassers kann die obenerwähnte Nichtübereinstimmung der Versuchsergebnisse in der magnetischen Wirkung des Eisens auf die Ablenkgeschwindigkeit gesucht werden. Durch die magnetische Wirkung des Eisens wird der Lichtbogenstiel mit einer größeren Kraft nach der Elektrode hin gezogen. Die bandförmige Überhitzung der Fußpunktspuren (Bild 10 e) bestätigt diese Erklärung.

Bei kleineren Geschwindigkeiten treten „Klebeerscheinungen“ des Lichtbogens auf. Da bei kleinerer Geschwindigkeit die Aufenthaltszeit verhältnismäßig groß ist, so entstehen infolge der Stoffwanderung an den Elektroden Schmorstellen verschiedener Größe und Höhe, die eine Ablenkung des Säulenstieles in der entgegengesetzten Laufrichtung der Säule oder, mit anderen Worten, eine Vergrößerung des Laufwinkels zur Folge haben. Unterhalb eines bestimmten Winkels zwischen Säulenstiel und der Elektrode kann die Entstehungsmöglichkeit eines Nebenlichtbogens sehr erschwert oder unmöglich werden.

Daher tritt die Wanderung, wie die Versuchsergebnisse zeigen, bei einer bestimmten treibenden Kraft (oder bei gegebener Anordnung bei einer bestimmten Stromstärke) plötzlich auf. Dieser Vorgang, also das Festhalten des Fußpunktes, sei als „Kleben“ bezeichnet, die zugehörige Geschwindigkeit und Stromstärke seien die „Klebegeschwindigkeit“ und die „Klebestromstärke“. Beim Kleben scheint die Höhe der Schmelz-

temperatur des Elektrodenwerkstoffes die Hauptrolle zu spielen. Die Klebestromstärke muß demnach bei Eisen kleiner werden als bei Kupfer und Aluminium, was durch die Versuche bestätigt wird.

Abhängigkeit der Wanderungsgeschwindigkeit von der Stromstärke

Wenn man die Versuchsergebnisse des Verfassers mit den anderen vergleicht, so sieht man einen gewissen grundlegenden Unterschied zwischen diesen und denen von *Freiberger*. Während vom Verfasser der Exponent v_0 der Stromstärke kleiner als 1 festgestellt wurde, scheint dieser nach dem Verlauf der v - I -Kurven von *Freiberger* größer als 1 zu sein. Hierüber kann man leider keine Erklärungen geben, da die Versuchsbedingungen in beiden Fällen nicht gleich waren.

Eine Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse des Verfassers mit denen von *Burghoff* zeigt im allgemeinen eine gewisse Übereinstimmung. Eine Unstetigkeit des kathodischen Fußpunktes, wie von *Burghoff* an Kupferelektroden bei kleineren Feldstärken ermittelt, wurde nicht festgestellt. Eigentlich müßte eine solche Unstetigkeit auch bei den Untersuchungen des Verfassers, also bei Wechselstrombögen, an den v - I -Kurven in Erscheinung treten, da die ermittelte Geschwindigkeit eine aus beiden Fußpunkten gebildete mittlere Geschwindigkeit darstellt, von denen die anodische stetig verläuft.

Kritische Betrachtung der Meßergebnisse

In Bild 12 sind die berechneten und gemessenen Werte der Lichtbogengeschwindigkeit, abhängig vom Lichtbogenstrom, Elektrodendurchmesser und Elektrodenabstand, vergleichsweise dargestellt. Aus dem Verlauf der Kurven geht hervor, daß wohl eine gewisse und sogar gute Übereinstimmung bei der Stromstärke festzustellen ist, eine Übereinstimmung bei Elektrodenabstand und Elektrodendurchmesser jedoch nicht besteht. Bei gemessenen Werten scheint die Abhängigkeit der Geschwindigkeit von Elektrodenabstand und -durchmesser viel stärker zu sein.

Dieser Unterschied läßt sich in großen Zügen wie folgt erklären: Bei der Aufklärung des Wanderungsmechanismus war darauf hingewiesen worden, daß der Lichtbogen nicht nur allein einer treibenden Kraft F'_1 ausgesetzt ist, sondern auch durch die Kräfte, z. B. F'_2 und F'_3 , beeinflusst wird (Bild 11). Vereinfachenderweise sollen nur die Kräfte F

und F'_3 in Betracht gezogen werden. Bei konstantem Abstand a und größer werdendem Durchmesser d müssen eigentlich F'_2 kleiner und F'_1 größer werden, so daß der Ablenkungswinkel größer wird. Infolgedessen werden sich die Wanderung verzögern und damit die Geschwindigkeit verkleinern.

Ähnliche Betrachtungen kann man auch für den Fall „ d = konstant; a = veränderlich“ anstellen. Bei der theoretischen Ableitung der Geschwindigkeitsformel wurden diese Umstände nicht berücksichtigt. Aus diesem Grunde kommt der erwähnte Unterschied zwischen Berechnung und Messung zustande. Bei diesen Betrachtungen war angenommen, daß in der Oberflächenbeschaffenheit keine Änderungen eingetreten sind. In Wirklichkeit aber kommt eine gewisse Änderung vor. Der Einfluß dieser Änderung äußert sich aber letzten Endes wieder durch das Auftreten der Kräfte F'_2 .

Aus diesen Erwägungen geht hervor, daß die theoretisch abgeleitete Geschwindigkeitsformel in bezug auf die Veränderlichen a und d , die in dem Faktor k_2 zusammengefaßt sind, nicht gelten kann. Daher muß eine neue Formel abgeleitet werden, welche die obengenannten Punkte mit berücksichtigt.

Zusammenfassung

Die Wanderungsgeschwindigkeit des Lichtbogens (Stromstärke bis etwa 1000 A bei 6 kV treibender Spannung) wurden an runden Kupfer-, Eisen- und Aluminiumelektroden mittels eines neuen Meßverfahrens ermittelt. Dabei wurden die Wanderungsgeschwindigkeit theoretisch berechnet, und ihre Abhängigkeit von der Stromstärke wurde an Hand der Meßergebnisse empirisch bestimmt und eine Beziehung in der Form $v = k \cdot (I/A)^{0,85}$ gefunden. Es besteht eine gewisse

Übereinstimmung zwischen Berechnung und Experiment bezüglich der Abhängigkeit von der Stromstärke. Dagegen besteht ein ziemlich großer Unterschied bezüglich der Abhängigkeit vom Elektrodendurchmesser und Elektrodenabstand, so daß die ermittelte Geschwindigkeitsformel in dieser Hinsicht nach einem anderen Gesichtspunkt abgeleitet werden muß.

Die Versuche zeigten, daß unterhalb einer bestimmten Stromstärke, der „Klebestromstärke“, bei einer gegebenen Anordnung keine Wanderung stattfindet. Die Wanderung fängt bei der „Klebegeschwindigkeit“ sprunghaft an. Die Versuchsergebnisse zeigen, daß die Wanderungsgeschwindigkeit an Eiselektroden größer als an Kupfer- und Aluminiumelektroden ist. Es wurde versucht, von der Wanderungsgeschwindigkeit ausgehend eine Beziehung zwischen dem Säulendurchmesser und der Stromstärke zu finden; dabei wurde eine Beziehung in der Form $D \sim (I/A)^{0,3}$ abgeleitet.

Die Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse mit denen von Ramberg, Burghoff und Freiburger zeigt eine gewisse Übereinstimmung und auch gewisse Unterschiede, die von grundlegender Bedeutung sind.

Schrifttum

- [1] Stolt, H.: Die Rotation des elektrischen Lichtbogens bei Atmosphärendruck. Ann. Phys., 4. Folge, Bd. 74 (1924) S. 80–104.
- [2] Ramberg, W.: Über den Mechanismus des elektrischen Lichtbogens. Ann. Phys., 5. Folge, Bd. 12 (1932) S. 319–352.
- [3] Burghoff, H.: Über die magnetische Ablenkung von Lichtbögen. Elektrotechn. u. Masch.-Bau Bd. 52 (1934) S. 49–53.
- [4] Freiburger, H.: Lichtbogenwanderung in Schaltanlagen. ETZ Bd. 61 (1940) S. 865–869.
- [5] Hochrainer, A.: Die Bewegung des Kurzschluß-Lichtbogens in Hochspannungs-Schaltanlagen. ETZ-A Bd. 77 (1956) S. 302–308.
- [6] Engel, A. v., u. Steenbeck, M.: Elektrische Gasentladungen, ihre Physik und Technik. Verlag Julius Springer, Berlin 1937.
- [7] Küpfmüller, K.: Einführung in die theoretische Elektrotechnik. 4. Aufl. Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1952, 8. 232, Gl. 762.

Die Regel- und Steuergrößen bei der Netzregelung

Von Hans Graner, Stuttgart*)

DK 621.311.1.07 : 621-50

Da die Schaffung des europäischen Verbundbetriebs eine enge internationale Zusammenarbeit der Reglerfachleute erforderlich macht, wird es immer notwendiger, über die Grundlagen der Netzregelung möglichst einheitliche Auffassungen zu erreichen und allgemein anerkannte Begriffe und Kenngrößen einzuführen. Hierzu soll im folgenden ein Beitrag geleistet werden¹⁾.

Allgemeines

Bei der Netzregelung ist die Regelstrecke das gesamte, synchron zusammenhängend betriebene Netzgebilde einschließlich der daran angeschlossenen Verbraucher. Sie setzt sich aus vielen verschiedenen Teilregelstrecken zusammen: den Erzeugermaschinenätzen und den Netzteilen oder Teilnetzen mit oder ohne Eigenerzeugung, wie Überlandnetze, gemeindliche oder städtische Elektrizitätswerke, Fabrikbetriebe usw., soweit sie an das allgemeine Elektrizitätsversorgungsnetz angeschlossen sind. Die Netze der europäischen Länder ihrerseits bilden dann das europäische Verbundnetz als Gesamtregelstrecke.

Die Zahl aller zugehörigen Teilregelstrecken ist in diesem Fall also sehr groß und dementsprechend auch die der zusammenarbeitenden Regler. Außerdem werden auf der Verbraucherseite ständig Maschinen und Geräte zu- und abgeschaltet, und auf der Erzeugerseite wird der Maschineneinsatz diesem wechselnden Bedarf durch In- und Außerbetriebsetzung, Belastung und Entlastung von Maschinensätzen laufend angepaßt. Es ist daher schwer, zu

einem bestimmten Zeitpunkt über Umfang und Eigenschaften der Gesamt- und Teilnetzregelstrecken bestimmte Angaben zu machen.

Bei den nachfolgenden Betrachtungen über die Netzregelstrecken wird von der bei einfachen Untersuchungen dieser Art üblichen Annahme ausgegangen, daß alle Maschinensätze des Netzes starr miteinander gekuppelt seien. Die elektromagnetischen Ausgleichsvorgänge werden also vernachlässigt. Die innere Verwindung des Netzes wird nur im Beharrungszustand in Betracht gezogen, und demgemäß bleiben auch die damit verbundenen vorübergehenden örtlichen Frequenzverschiedenheiten unberücksichtigt. Desgleichen wird auch auf die Spannungs- und Blindleistungsregelung nicht eingegangen, obwohl sie ebenfalls zur Netzregelung gehören; sie werden zweckmäßigerweise für sich behandelt.

Die Regelgrößen bei der atypischen Netzregelung

Als atypisch werden Netzregelverfahren bezeichnet, die den Lastanfallpunkt, d. h. die örtliche Lage des Netzpunkts, in dem eine Belastungsänderung entsteht, bei ihren Regeleingriffen nicht berücksichtigen, während dies bei den typischen Verfahren in irgendeiner Form geschieht.

Die Grundlage der Netzregelung bildet die Drehzahlregelung von Kraftmaschinen, weil die einzelnen Maschinensätze nicht nur die wichtigsten Bausteine des Netzes sind, sondern auch die einfachste Form eines Netzes darstellen,

*) Prof. Dr.-Ing. H. Graner war Inhaber des Lehrstuhls für Elektrische Anlagen an der TH Stuttgart, bis er seine Lehrtätigkeit krankheitshalber aufgeben mußte.

1) Zu einigen Stellen des Aufsatzes hat Dipl.-Ing. P. F. Heidinger wertvolle Hinweise gegeben.

Vgl. hierzu auch die z. Z. in der ETZ-A erscheinende Aufsatzfolge über Wortbildung, Schreibweise und internationale Angleichung von Fachausdrücken [1].

wenn sie einen Verbraucher oder eine Verbrauchergruppe speisen. Demgemäß stimmt die Hauptregelgröße bei der Netzregelung mit derjenigen der Maschinenregelung überein, nur daß man bei ihr mit der Winkelgeschwindigkeit ω der Maschinenwelle oder mit deren minutlicher Drehzahl n zu rechnen pflegt, bei der Netzregelung dagegen mit der ihnen proportionalen Netzfrequenz f .

Den Übergang von der Maschinenregelung zur Netzregelung bildet der Schritt von einem einzigen Erzeugermaschinensatz mit Verbrauchern zu zwei oder mehreren auf eine Sammelschiene oder ein Netz parallel arbeitenden Einheiten.

Bei beiden, der Maschinen- wie der Netzregelung, handelt es sich zunächst gleichermaßen um das Konstanthalten der Drehzahl und Frequenz auf einem ein für allemal gegebenen Sollwert oder einem in dessen Nähe liegenden Wert. Voraussetzung hierfür ist auch in beiden Fällen — bei der Netzregelung wie bei der Maschinenregelung — ein Gleichgewichtszustand zwischen Antriebs- und Bremsmoment oder mit anderen Worten zwischen Leistungszufuhr und Leistungsentnahme aus den umlaufenden Maschinenschwungmassen.

Diese ständige Anpassung der Zufuhr an die Entnahme wird bekanntlich erstens durch den Maschineneinsatz und zweitens mittels der Drehzahl- (Frequenz-) Regler der jeweils auf das Netz arbeitenden Maschinensätze erreicht. Dabei werden die Maschinen nach den beiden Gesichtspunkten der Vorausplanung und der laufenden Anpassung an den augenblicklichen Betriebszustand eingesetzt. Die Vorausplanung macht sich die Tatsache zunutze, daß die Belastungskurven des Netzes von Tag zu Tag nur geringfügige Änderungen erfahren und daher auf Grund der laufenden Aufschreibungen im voraus ziemlich genau bekannt sind, zumal wenn man auch noch die meteorologischen und hydrologischen Voraussagen dabei mit berücksichtigt. Welche große Erleichterung dies für die Regelung bedeutet, erkennt man, wenn man sich für einen Augenblick den entgegengesetzten Grenzfall vorstellt, daß die Netzbelastung jederzeit in nicht voraussehender Weise plötzlichen Schwankungen zwischen Null und dem möglichen Höchstwert unterworfen sei, so daß sämtliche Maschinen ständig am Netz bleiben müßten und die Regler alle Laständerungen in voller Größe auszuregulieren hätten. Die erwähnte laufende Anpassung des Maschineneinsatzes an die augenblicklichen Betriebserfordernisse wird nach der jeweiligen Leistungsabgabe der im Netz zur Frequenzhaltung oder Austauschleistungsregelung eingesetzten Regelmaschine oder Regelmaschinengruppe durchgeführt, indem diese ständig auf einer mittleren Belastung gehalten wird.

Der Maschineneinsatz gehört also aufgabenmäßig mit zur Regelung, denn er leistet für sie eine sehr wichtige Vorarbeit. Man kann ihn freilich nicht als Regelung (Handregelung) im eigentlichen Sinne bezeichnen, weil das Merkmal der unmittelbaren Messung einer Regelgröße fehlt und er sich nur auf gelegentliche oder frühere Messungen stützt. Immerhin können Maschineneinsatz und Regelung als ein Ganzes betrachtet und auch zusammengefaßt werden, wovon später noch kurz die Rede sein soll.

Außer der Frequenz selbst kann auch ihre Änderungsgeschwindigkeit f' als eigene Regelgröße angesehen werden, wenn die Drehzahl- (Frequenz-) Regler mit einem f' -Meßwerk ausgerüstet, also Regler mit D-Einfluß (Regler mit Vorhalt, Vorfühlregler) sind²⁾. Man könnte f' dann sogar als die erste Regelgröße bezeichnen, weil die Frequenz nur konstant bleibt, wenn ihre Änderungsgeschwindigkeit f' Null ist, was zugleich bedeutet, daß die Leistungszufuhr in das Netz gleich dem Gesamtverbrauch und -verlust geworden ist. Wenn f' nicht durch ein eigenes Meßwerk, sondern nur näherungsweise erfaßt wird, kann man im Zweifel sein, ob man nach DIN 19 226, 1 Abs. 1 und 3.1 [2] noch berechtigt ist, sie als Regelgröße zu betrachten. Ein solcher Fall liegt beispielsweise vor, wenn die Änderungsgeschwindigkeit f' als Unterschied zwischen der einer Maschine zugeführten

und der von ihr abgegebenen Leistung näherungsweise festgestellt wird, etwa in der Form, daß als Maß für die zugeführte Leistung der — gegebenenfalls durch eine Kurvenscheibe und Meßwerke für Gefälle, Druck und Temperatur berichtigte — Hub des Stellglieds (Rückführung) benutzt und die abgegebene Leistung durch einen an den Generator-klemmen liegenden Leistungsmesser gemessen wird (Störgrößenaufschaltung). Man könnte vielleicht in solchen Fällen die Änderungsgeschwindigkeit f' als Hilfs- und Vorregelgröße bezeichnen.

Bei der Netzregelung kommt als weitere Regelaufgabe der Netze die Verteilung der Gesamterzeugung auf die verschiedenen parallel arbeitenden Erzeugermaschinensätze hinzu. Alle Möglichkeiten hierfür ausfindig zu machen und die im einzelnen Falle geeignetsten unter ihnen auszusuchen, ist die Hauptaufgabe der Netzregelungstheorie. Zunächst seien hier die bisher bekanntgewordenen atopischen Verfahren kurz aufgeführt:

1. Die parallel arbeitenden Maschinensätze sind mit Drehzahl- (Frequenz-) Reglern ausgerüstet. Eine Querverbindung (Gleichlaufsteuerung) zwischen ihnen sorgt dafür, daß die Gesamtbelastung des Netzes nach einem bestimmten Schlüssel auf die Einheiten verteilt wird. Es handelt sich hier um ein selten angewendetes, heute überholtes Verfahren.

2. Die parallel arbeitenden Maschinensätze sind mit Stellmotoren oder Drehzahl- (Frequenz-) Reglern ausgerüstet, denen von einer übergeordneten Frequenzregleinrichtung laufend bestimmte Stellgliedhübe (Stellgrade) und damit Anteile an der Netzbelastung vorgeschrieben werden. Das Verfahren ist zwar nicht zur Heranziehung aller parallel arbeitenden Maschinensätze zu verwenden, aber zur Zusammenfassung mehrerer Einheiten zu einer Regelmaschinengruppe sehr geeignet und daher (auch für topische Netzregelverfahren) von großer praktischer Bedeutung.

3. Die parallel arbeitenden Maschinensätze sind mit Reglern ausgerüstet, die kennlinienmäßige Beziehungen zwischen der Drehzahl (Frequenz) und den ihren Maschinen zugeführten oder von diesen abgegebenen Leistungen einregeln, so daß sich durch das Zusammenwirken aller dieser Regler je nach der Einstellung der Kennlinien bestimmte Werte für die Drehzahl (Frequenz) und die genannten Leistungen ergeben. Dieses Verfahren ist das altbekannte Drehzahl- (Frequenz-) Regelverfahren.

4. Ein Verfahren, wie unter Ziffer 3 beschrieben, bei dem jedoch eine Maschine oder Maschinengruppe mit reiner Drehzahl- (Frequenz-) Regelung vorhanden ist, die den Frequenzsollwert einhält und damit alle Laständerungen im Netz übernimmt (Frequenz-I-Regelung).

5. Die parallel arbeitenden Maschinensätze sind mit Reglern ausgerüstet, die kennlinienmäßige Beziehungen zwischen der zugeführten oder abgegebenen Maschinenleistung und dem Gang, d. h. dem Zeitintegral der Frequenzabweichung vom Sollwert, einregeln, so daß sich je nach der Einstellung der Kennlinien bestimmte Werte für den Gang und die genannten Leistungen ergeben, die Frequenz dagegen stets wieder auf ihren Sollwert zurückkehrt, da sonst der Gang sich weiter verändern würde (Gangregelung System Warren [3, 4]). Dieses Verfahren wird praktisch selten angewendet; es kommt heute nur noch als Aushilfslösung für den Notfall in Betracht. Sonst ist es durch die topischen Regelverfahren überholt.

6. Ein Verfahren, wie unter Ziffer 5 beschrieben, bei dem jedoch eine Maschine oder Maschinengruppe mit reiner Frequenz-Gangregelung, d. h. ohne Leistungseinfluß vorhanden ist. Es ist ein praktisch wohl nie angewendetes Verfahren, das für den Fall, daß Synchronuhren an das Netz angeschlossen sind, den Gang auf Null halten würde.

Beim Drehzahlregelverfahren nach Ziffer 3 tritt als neue Regelgröße die Maschinenbelastung auf, sei es in Form der von der Maschine aufgenommenen oder abgegebenen Leistung. In dieser Hinsicht besteht ein wesentlicher

²⁾ Siehe [2] 5, 215.

Unterschied zwischen der Drehzahlregelung einzelner Maschinen und der Netzregelung. Während nämlich bei der erstgenannten die Maschinenbelastung durch Verbrauch und Verlust eindeutig bestimmt wird, gilt dies bei der Netzregelung nur für die Gesamtbelastung aller parallel arbeitenden Maschinen, während die Einzelbelastungen innerhalb dieses Rahmens beliebig regelbar sind. Man kann somit eine bestimmte Verteilung der Gesamtbelastung nach irgendeinem durch die Kennlinieneinstellung bestimmten Schlüssel erzielen, was etwa der in den chemischen Betrieben mitunter vorkommenden „Mischungsregelung“ entspricht. Wie dort das Mischungsverhältnis, so kann man auch hier an Stelle der Einzelbelastungen die Lastverteilung als Regelgröße auffassen.

Beim Frequenzmaschinenverfahren nach Ziffer 4 gilt die Lastaufteilung nur für den Übergangszustand während der Regelung, im Endzustand dagegen kehren alle parallel arbeitenden Maschinen — mit der alleinigen Ausnahme der Frequenzmaschine — wieder auf ihre früheren Ausgangswerte zurück. Sie werden also auch bei schwankender Netzbelastung auf bestimmte Sollwerte eingeregelt. Da nach DIN 19 226, 5.211 und 5.212 [2] Regler, die im Beharrungszustand jedem Wert der Regelgröße einen bestimmten Wert der Stellgröße zuordnen, als P-Regler bezeichnet werden, könnte man im Zweifel sein, ob man die Maschinenbelastung tatsächlich als besondere Regelgröße auffassen kann oder ob man von einer P-Wirkung sprechen muß, wenigstens in dem Fall, daß die zugeführte Maschinenleistung als Belastung angesehen wird. Dabei müßte aber vorausgesetzt werden, daß die zugeführte Leistung die Stellgröße ist, was keineswegs von vornherein feststeht, worüber vielmehr später noch gesprochen werden muß. Aber selbst dann, wenn man die zugeführte Leistung tatsächlich als Stellgröße betrachtet, so hat man noch die Freiheit, von einer Zuordnung zwischen Regelgröße und Stellgröße oder zwischen Regelgröße und Leistungszufuhr zu sprechen. Häufig besteht zwischen beiden aber insofern ein Unterschied, als die Stellgröße über eine Kurvenscheibe auf den Regler zurückwirkt, weil Stellgröße und Leistungszufuhr nicht über den ganzen Betriebsbereich hinweg einander proportional sind. Man kann darüber streiten, ob man hier von einer Messung der Leistungszufuhr mit Hilfe der Rückführung sprechen und demgemäß die Leistungszufuhr als Regelgröße auffassen darf. Es wird sich dabei immer nur um eine näherungsweise Messung handeln, auch wenn man Gefälle, Dampfdruck und Temperatur mit berücksichtigt. Eindeutig werden die Verhältnisse erst, wenn an Stelle der zugeführten die abgegebene Leistung tritt, die mit einem an den Generatorklemmen angeschlossenen Leistungsmesser gemessen wird. Folgerichtigerweise sollte man die Bezeichnung P-Regler daher bei der Netzregelung mit Vorbehalt anwenden und nie außer acht lassen, daß es sich dabei eigentlich um eine Mehrgrößenregelung handelt.

Bei den unter Ziffer 5 und 6 genannten Regelverfahren erscheint als neue Regelgröße der Gang, der gewöhnlich mittels irgendeines Differentials als Perioden- oder Winkelunterschied zwischen der Netzfrequenz und einer konstanten, vorgegebenen, mit der Nennfrequenz übereinstimmenden Frequenz gemessen wird. Mit diesem Verfahren können die Mängel der beiden unter Ziffer 3 und 4 genannten Verfahren vermieden werden, die sich daraus ergeben, daß man die Netzfrequenz nicht als Kriterium für die Verteilung der Laständerungen benutzen und zugleich konstant halten kann. Dieser Widerspruch zwingt beim Drehzahl- (Frequenz-) Regelverfahren nach Ziffer 3 dazu, die Netzfrequenz mit der Netzbelastung etwas schwanken zu lassen, und beim Verfahren nach Ziffer 4, auf eine freizügige Lastverteilung zu verzichten und der frequenzhaltenden Maschine die Ausregelung aller Lastschwankungen zu überlassen. Wenn Synchronuhren an das Netz angeschlossen werden sollen, hat die Gangregelung die weitere Aufgabe, die Zeitfehler dieser Uhren genügend klein zu halten, was im allgemeinen leicht möglich ist. Der einzuhaltende Gangwert kann inner-

halb ziemlich weiter Grenzen gewählt werden. Maßgebend ist einmal der Kostenaufwand, insbesondere für die Normalfrequenzerzeuger und für die Übertragung der vorgegebenen Frequenz zu den Reglern hin, und zweitens die gewünschte Regelgenauigkeit und -geschwindigkeit. Wenn man die Messung so weit verfeinert, daß man den Gang bis auf Winkelgrade genau erfassen kann, kann man die Netzverwindung, d. h. die Phasenunterschiede, zwischen den Netzspannungszeigern in verschiedenen Netzknoten auf bestimmten Werten halten. Aus der Regelgröße Gang wird dann die Regelgröße Drehung und aus der atopischen Gangregelung die topische Drehungsregelung, von der im folgenden die Rede sein soll.

Die bei der topischen Regelung hinzukommenden weiteren Regel- und Steuergrößen

Je größer die zusammenhängend betriebenen Netze und Netzverbände ihrer räumlichen Ausdehnung nach werden, desto mehr nimmt die praktische Bedeutung der topischen Verfahren zu. Denn das gesamte Netzgebilde und die Energieströmung in ihm werden immer unübersichtlicher; die von Leistungsfluktuationen hervorgerufenen Verluste fallen immer mehr ins Gewicht; die Gefahr von Überlastungen der Leitungswege nimmt zu. Zugleich verlockt aber auch der größere „Markt“ — d. h. die wachsende Auswahl an Energiequellen (Erzeugermaschinensätze und Kraftwerke der verschiedenen Art), die zur Deckung eines bestimmten örtlichen Leistungsbedarfs zur Verfügung stehen — zu planmäßiger Ausnutzung dieser Möglichkeiten unter genauer Abwägung der geldlichen und energetischen Vor- und Nachteile, insbesondere auch der Verluste, die einerseits in den Leitungen, andererseits in den Erzeugermaschinensätzen entstehen. Die gegenseitigen Aushilfen in Störungsfällen müssen sich ebenfalls in geordneten Bahnen und möglichst selbsttätig vollziehen. Dazu kommt schließlich, daß solche großen Netzgebilde häufig verschiedenen Besitzern (Gesellschaften, Ländern) gehören, die ihren gegenseitigen Energieaustausch und ihre Dienstleistungen (Leitungsbenutzung, Verlustdeckung) gegenseitig abrechnen müssen. Alles in allem genommen besteht hiernach der Unterschied zwischen der Aufgabenstellung bei den topischen und bei den atopischen Netzregelverfahren darin, daß bei den topischen Verfahren die Energieströmung in den Hauptleitungen mehr oder weniger geregelt, bei den atopischen dagegen mehr oder weniger ungeregelt verläuft.

Die topischen Netzregelverfahren kann man in zwei Hauptgruppen einteilen. Bei der ersten Gruppe vorstellen die Regler wie bei den atopischen Verfahren aller Art die Stellglieder der Erzeugermaschinensätze und ändern damit den Leistungsfluß in das Netz. Die zweite Gruppe beeinflusst unmittelbar die Energieströmung in den Netzleitungen.

Um hier eindeutige Begriffe und Bezeichnungen zu bekommen, betrachtet man am besten noch einmal das Netz als Ganzes und die Gesamtheit aller zugehörigen Netzregelaufgaben. Dabei kann man drei Arten von Regelungen oder Steuerungen unterscheiden, nämlich die Zuflußregelung, die Abflußregelung und die Durchflußregelung³⁾.

Die Zuflußregelung wirkt, wie eben gesagt, auf die Stellglieder der Erzeugermaschinensätze und damit auf die Gesamtzeugung ein. Sie kann atopisch oder topisch sein. Bei der topischen Regelung werden im Gegensatz zur atopischen von den Reglern zur Deckung von Laständerun-

3) Man könnte statt dessen auch an die Bezeichnungen Erzeugungsregelung, Verbrauchsregelung und Energieströmungsregelung denken, doch erscheinen diese weniger empfehlenswert als die oben genannten, einmal weil sie etwas länger als diese und nicht so symmetrisch wie sie aufgebaut sind, und zweitens, weil Energie, streng genommen, weder erzeugt noch verbraucht werden kann. Allerdings läßt sich diese unphysikalische Ausdrucksweise wohl kaum ganz vermeiden. In der Tat wird später bei Betrachtung der Leistungsverhältnisse in den Netzteilen oder Teilnetzen von Erzeugung und Verbrauch gesprochen. In diesem Falle sind nämlich die Bezeichnungen Zufluß und Abfluß nicht sehr zweckmäßig, da auch noch die Austauschleistungen zu oder von anderen Netzteilen oder Teilnetzen vorhanden und je nach ihrem Vorzeichen zum Zufluß oder zum Abfluß zu rechnen sind.

gen solche Maschinensätze ausgesucht, die unter bestimmten Gesichtspunkten betrachtet örtlich günstig liegen.

Die Abflußregelung erstreckt sich auf die Entnahme von Leistungen aus dem Netz durch die Verbraucher. Im allgemeinen werden diese zwar ihren Leistungsbezug je nach ihren augenblicklichen Bedürfnissen einstellen. Grundsätzlich aber gibt es auch die Möglichkeit der Regelung der Entnahme, insbesondere bei solchen Abnehmern, die über eigene Stromerzeugungsanlagen verfügen, wie Überlandnetze, städtische oder Industriebetriebe. Für das Gesamtnetz ist es erwünscht, wenn solche Verbraucher ihren Bezug mit Hilfe von Netzkennlinienreglern frequenzabhängig auf bestimmten vereinbarten Werten halten, weil damit die Stabilität des Gesamtnetzes, d. h. seine Leistungszahl, verbessert wird. Ähnliches gilt auch für Verbraucher ohne eigene Erzeugungsanlagen, wie etwa chemische Betriebe, sofern sie ihren Verbrauch frequenzabhängig machen können.

Zwischen der Zufluß- und der Abflußregelung steht die Durchflußregelung, d. h. die Beeinflussung der Energieströmung in einzelnen Netzleitungen oder, allgemeiner ausgedrückt, des Energieströmungsfeldes im Gesamtnetz. Die Durchflußregelung kann auf zwei Arten verwirklicht werden. Erstens durch die Zuflußregelung, insbesondere durch die topische Zuflußregelung, und auch in beschränktem Umfang durch die Abflußregelung, weil Zu- und Abfluß den Durchfluß bestimmen. Die zweite Möglichkeit der Durchflußregelung kann man vielleicht als Durchlaßregelung bezeichnen. Sie greift unmittelbar in die Leitungswege ein, indem sie entweder durch Quer- und Längsregeltransformatoren oder durch Kondensatoren, Drosselspulen usw. Spannungen bestimmter Größe und Richtung in die Leitung einführt, die dann als die Stellgrößen zu betrachten sind. Die Durchlaßregelung wirkt unterschiedlich, je nachdem welches Regelverfahren für die Zuflußregelung angewendet wird. Bei der Netzkennlinienregelung werden durch die Durchlaßregler Ringflüsse hervorgerufen, oder anders ausgedrückt, die Leistungsflüsse werden von einer Leitung auf die andere verdrängt. Bei der Drehungs- und Torsionsregelung dagegen, von denen noch die Rede sein wird, üben die Durchlaßregler eine Rückwirkung auf die Zuflußregler aus, weil diese nicht den Zufluß unmittelbar beeinflussen, sondern die Drehung bzw. Torsion, die ihrerseits dann erst entsprechende Leistungsflüsse nach sich ziehen. Streng genommen arbeiten dann die Zuflußregelung und auch die Durchflußregelung bezüglich der Leistungen als Steuerung, weil diese nicht gemessen werden.

Im folgenden soll von der Durchlaßregelung nicht mehr die Rede sein, zumal sie vorläufig keine große praktische Rolle spielen dürfte. Nur so viel sei ergänzend noch bemerkt, daß jede in der angegebenen Weise geregelte Leitung eine neue Regelstrecke bildet, die mit den übrigen gleichartigen Regelstrecken und bei der Drehungs- und Torsionsregelung auch mit der Zuflußregelung in Wechselbeziehung steht. Man hat also unter Umständen eine große Zahl weiterer Regelgrößen, nämlich die Leistungsflüsse in den betreffenden Leitungen, die häufig Übergabeleistungen zwischen einzelnen Teilnetzen oder Netzteilen sind.

Die topischen Verfahren der Zuflußregelung kann man in die folgenden drei Hauptgruppen einteilen:

1. Die Netzkennlinienverfahren mit ihren verschiedenen Abwandlungen [5, 6], insbesondere die Netzgangkennlinien-Regelung, die Doppelnetz(gang)kennlinien-Regelung, die Netz(gang)kennlinien-Regelung bei unvollständiger Netzaufteilung, mit zusätzlicher Arbeitsregelung, mit überproportionalem Leistungseinfluß usw.

Das Grundprinzip bei allen diesen Verfahren besteht darin, daß das Gesamtnetz in einzelne Bezirke (Teilnetze oder Netzteile) aufgegliedert und der Leistungsaustausch zwischen diesen durch die zusammenarbeitenden Netzkennlinienregler auf fahrplanmäßigen Werten festgehalten wird, was gleichbedeutend damit

ist, daß alle innerhalb der Bezirke anfallenden Laständerungen örtlich gedeckt werden. Zugleich wird auch die Frequenz entweder unmittelbar oder durch die überlagerte Gangregelung auf ihren Sollwert eingeregelt.

2. Die bereits kurz erwähnte Torsions- oder Verwindungsregelung [7], die zwischen der Netzkennlinienregelung und der ebenfalls bereits kurz erwähnten und gleich noch näher zu besprechenden Drehungsregelung steht.

Die Regelgröße ist hier die Verwindung oder Torsion des Netzes, d. h. der Winkelunterschied zwischen den örtlichen Netzspannungszeigern in den Netzpunkten, in denen die Torsionsregler aufgestellt werden, und dem Torsionsnullzeiger, der an einer geeigneten, etwa im Schwerpunkt des Gesamtnetzes liegenden Stelle entnommen und allen Torsionsreglern zugeführt wird. Für die Konstanzhaltung der Netzfrequenz wird beispielsweise durch eine geeignete Frequenzmaschine oder -maschinengruppe oder aber mit Hilfe eines der Netzkennlinienverfahren gesorgt. Man hat die Freiheit, nur einzelne Teilnetze oder Netzteile nach diesem Verfahren zu betreiben, das Gesamtnetz dagegen nach einem Netzkennlinienverfahren.

3. Die Drehungsregelung [8 bis 12].

Die Regelgröße ist hier die Drehung, d. h. der Winkelunterschied zwischen den örtlichen Netzspannungszeigern in den Netzpunkten, in denen die Drehungsregler aufgestellt werden, und einem mit der Sollfrequenz umlaufenden, unabhängig vom Netz erzeugten Drehungsnullzeiger (Richtspannungszeiger). Die Drehungsregler sorgen damit zugleich auch für Konstanzhaltung der Netzfrequenz.

Bei den unter Ziffer 1 genannten Netzkennlinienverfahren erscheinen als weitere Regelgrößen die Austauschleistungen zwischen einzelnen Netzteilen oder Teilnetzen, d. h. die algebraische Summe aller über die Grenzen dieser Netze hinaus- und hereinfließenden Leistungen. Zum Unterschied hiervon bezeichnet man zweckmäßigerweise Leistungsflüsse in einzelnen Kuppelleitungen als Übergabeleistungen oder Übergaben, wie dies bereits geschehen ist. Nur in dem Fall, daß Netzteile oder Netze über eine einzige Kuppelleitung miteinander verbunden sind, deckt sich der Austausch mit der Übergabe. Die Summe aller Austauschleistungen in einem restlos aufgeteilten Netz ist bekanntlich Null und ebenso auch die Summe ihrer Sollwerte, da jeder diesbezüglichen Vereinbarung zwischen zwei Teilnetzen der gleiche Austauschleistungswert einmal als Ausfuhr und dann als Einfuhr erscheint. Die einzelnen Netzkennlinienregler sind Mehrgrößenregler, die kennlinienmäßige Beziehungen zwischen den Austauschleistungen und der Frequenz oder dem Gang herstellen. Daß in einem vermaschten Netzgebilde durch die Netzkennlinienregler nur die Austauschleistungen, nicht aber die einzelnen Übergaben auf zeitplanmäßigen Werten gehalten werden können, ist nicht unbedingt ein Nachteil. Denn der Austausch kann sich dadurch den jeweiligen Impedanzverhältnissen im Leitungsnetz anpassen, wodurch meist an Verlusten gespart wird. Man wird deshalb, wie schon bemerkt, im allgemeinen wohl auf eine zusätzliche Durchlaßregelung verzichten können.

Je feiner man das Netz aufteilt, je größer also die Zahl der Netzkennlinienregler wird, desto genauer wird die Energieströmung im Gesamtnetz vorgeschrieben. Der Grenzfall wäre der, daß in den Knotenpunkten des Höchstspannungsnetzes die Summen der zu- und abfließenden Leistungen auf bestimmten Sollwerten gehalten werden. Dann wären die Leistungsflüsse (Übergaben) in allen Höchstspannungsleitungen festgelegt. Frei wählbar sind aber auch in diesem Grenzfall nur die Summen der in jedem Knotenpunkt zugeführten oder aus ihm entnommenen Austauschleistungen, nicht die durch die Impedanzverhältnisse mitbestimmten Leistungsflüsse (Übergaben) in den einzelnen Leitungen. Diese Betrachtung hat aber nur theoretische Bedeutung. Man wird vielmehr umgekehrt aus den eben angegebenen Gründen und wegen der Kosten die Teilnetze

nicht zu klein und damit die Zahl der Regelgrößen und Regler nicht zu groß wählen.

Die Austauschleistungsregelung ist insofern keine leichte Aufgabe, als sich in den Austauschleistungen alle Veränderungen der Leistungszufuhr und Leistungsentnahme bei den einzelnen Netzteilen oder Teilnetzen fast augenblicklich widerspiegeln und es deshalb physikalisch unmöglich ist, sie mit Reglern völlig auszugleichen. Dies ist aber auch nicht nötig, sondern würde im Gegenteil — ebenso wie das bereits besprochene Festhalten einzelner Übergaben — eine Übertreibung des topischen Prinzips bedeuten, die überflüssige Regelbewegungen und Lastschwankungen bei den Erzeugermaschinensätzen zur Folge hat. Das beste ist ein Mittelweg, bei dem Schwankungen der Austausch- und Übergabeleistungen bis zu einer Größe oder Bandbreite zugelassen werden, die erstens nicht zu plötzlichen Überlastungen der Leitungswege und ihrer Abschaltung führen kann, die zweitens keine zu großen zusätzlichen Verluste und Erwärmungen in den Leitungen und Transformatoren hervorruft und dadurch deren Belastbarkeit verringert, und drittens die Einhaltung der vereinbarten Energielieferungen und ihre Abrechnung nicht zu sehr erschwert. Dieser letztgenannte Gesichtspunkt kann besonders dann eine Rolle spielen, wenn das Gesamtnetz verschiedenen Besitzern gehört und längs ihrer Besitzgrenzen aufgeteilt ist.

Ein wichtiges Mittel ist die sorgfältige „Pflege“ des Maschineneinsatzes, weil sie vorbeugend wirkt. Günstig ist dabei, daß der Maschineneinsatz bei der Netzkennlinienregelung mit Hilfe der Austauschleistungs-Meßwerke in den Befehlsstellen der Teilnetze oder Netzteile auch topisch gemacht werden kann; denn es besteht dann eine gewisse Wahrscheinlichkeit dafür, daß sich die einzelnen Fehler zum Teil gegeneinander ausgleichen. Im übrigen kann es sich empfehlen, den Maschineneinsatz in der Weise zu automatisieren, daß man die Be- und Entlastung der Maschinensätze nicht durch Betätigen der Drehzahlverstellmotoren von Hand stufenweise vornimmt, sondern mittels stetig arbeitender Stellgeräte zeitplanmäßig innerhalb längerer Zeiträume, bei den großen, neuzeitlichen Turbosätzen beispielsweise innerhalb mehrerer Stunden.

Da mit fortschreitender Netzvermaschung die Energieströmung im Netz immer unübersichtlicher wird, werden auch die Abrechnungsschwierigkeiten voraussichtlich wachsen, zumal die einzelnen Netze oder Netzteile dann von fremden Energieströmen durchflossen werden können, die ihre Leitungen zusätzlich belasten und für die sie die Verluste aufbringen müssen. Deshalb kann es sich empfehlen, der Austauschleistungsregelung noch eine Regelung der innerhalb eines gewissen Zeitraums zu viel oder zu wenig gelieferten elektrischen Arbeit zu überlagern. Die Regelgröße ist dabei das Zeitintegral der Austauschleistungsabweichungen von den für die Austauschleistungen vorgesehenen Sollwerten. Diese Regelung wird die Austauschleistungsschwankungen und ihre Bandbreite kaum verändern, aber die Mittelwerte der Austauschleistungen auch für kürzere Zeiträume gut einhalten, was dem Bedienungspersonal nicht leichtfällt. Gerade hierauf wird es aber am meisten ankommen, da kurzzeitige Austauschleistungsspitzen nach dem bereits Gesagten nicht unerwünscht sind, sofern sie sich bald zugunsten des einen und dann des anderen Partners auswirken. Wenn die Regelung beispielsweise dafür sorgt, daß zu wenig oder zu viel gelieferte oder bezogene elektrische Arbeitsmengen innerhalb von Viertelstunden gegeneinander ausgeglichen werden, so kann man auch bei schwankendem Austausch leicht abrechnen, da innerhalb so kurzer Zeitabschnitte der Arbeitspreis sich kaum ändert.

Beim Doppelnetzkennlinien-Verfahren können die Regler mit der Einhaltung zweier Austauschleistungen beauftragt sein, gegebenenfalls in der Weise, daß sie zunächst die eine und dann die andere einzuhalten haben, worauf hier aber nicht näher eingegangen werden soll.

Die Regelgrößen Torsion und Drehung bei den unter Ziffer 2 und 3 aufgeführten beiden Regelverfahren kann man als Wirkleistungspotential des Netzes auffassen, da sowohl der Torsions- als auch der Drehungsunterschied zwischen zwei Spannungszeigern an verschiedenen Netzknoten nichts anderes ist als der Winkelunterschied zwischen ihnen, der bekanntlich bei allen Arten von Energiestrombahnen (Generatoren, Transformatoren, Leitungen usw.) bei gleichbleibenden Spannungswerten annähernd proportionale Wirkleistungsflüsse hervorruft. Man kann hiernach, indem man die Torsion oder die Drehung regelt, mittelbar die Leistungsflüsse im Netz beherrschen. Dies ist aber keine Regelung im Sinne von DIN 19 226, weil die Leistungen in den Leitungen dabei nicht unmittelbar gemessen werden. Es liegt hier also eine Steuerung vor und man müßte in diesem Fall die Austausch- und Übergabeleistungen sinngemäß als Steuergrößen bezeichnen. Man kann aber bei der Torsions- und Drehungsregelung auch kennlinienmäßige Beziehungen zwischen Torsion und Drehung einerseits und irgendwelchen Leistungswerten andererseits durch die Regler herstellen lassen. Wenn diese Leistungswerte, die beispielsweise Austausch- oder Übergabeleistungen oder den Erzeugermaschinensätzen zugeführte oder von ihnen abgegebene Leistungen sein können, unmittelbar gemessen werden, handelt es sich nicht mehr nur um eine Steuerung, sondern um eine Mehrgrößenregelung, und die genannten Leistungswerte sind wirkliche Regelgrößen.

Alles in allem genommen hat man also bei der Netzregelung in erster Linie die folgenden Regelgrößen:

Änderungsgeschwindigkeit der Frequenz,
Frequenz,
Gang,
Torsion oder Verwindung,
Drehung,
Maschinenbelastung oder Lastverteilung,
Austauschleistung (oder kürzer: Austausch),
Übergabeleistung (oder kürzer: Übergabe),
Austauscharbeit,
Übergabearbeit.

Bemerkungen über die weitere Entwicklung

Eine befriedigende Zusammenarbeit vieler Regeleinrichtungen, wie sie bei großen Netzverbänden unerlässlich ist, kann nur erwartet werden, wenn die Regler alle so weit wie irgend möglich aufeinander abgestimmt sind. Da in der europäischen Elektrizitäts-Verbundwirtschaft keine übergeordnete Stelle vorhanden ist, die diesbezügliche Anweisungen geben könnte, muß zunächst eine einheitliche Auffassung aller Beteiligten — sozusagen von innen her — durch die Einsicht in die Zweckmäßigkeit oder Notwendigkeit zu treffender Maßnahmen erreicht werden. Dies ist die erste Voraussetzung für die Schaffung eines universalen Netzreglertyps für alle europäischen Länder, der jeder vor kommenden Aufgabe gewachsen ist, der mit anderen Worten für alle in Betracht kommenden Regelgrößen eingerichtet ist, alle Einflußfaktoren von Null bis zu den vorgesehenen Höchstwerten zu verstellen gestattet, nach Wahl als I-, PI- oder PID-Regler, linear oder nötigenfalls auch nicht linear arbeiten kann. Ohne ein solches Spitzenerzeugnis, bei dem alle bisher gesammelten praktischen Erfahrungen berücksichtigt und die modernsten Mittel der Nachrichtentechnik angewendet sind, wird ein brauchbarer Verbundbetrieb, insbesondere auch bei weitgehender Vermaschung des Gesamtnetzes, kaum zu erreichen sein. Hierzu ist sehr wahrscheinlich auch ein geringerer Gesamtaufwand erforderlich als für mehrere verschiedenartige und deshalb schwer aufeinander abstimmbare Regeleinrichtungen.

Im übrigen sei noch bemerkt, daß man den europäischen Verbundbetrieb vielleicht auch einmal mit Hilfe von Gleichstrom-Höchstspannungsübertragungen wird aufbauen können. Diese in Deutschland schon frühzeitig erkannte und

durch einen Großversuch erprobte Möglichkeit [13 bis 16] wird bekanntlich zur Zeit in Rußland und bei der Überquerung des Ärmelkanals verwirklicht. Er erscheint nach dem heutigen Stand der Technik nicht ausgeschlossen [17], daß solche Gleichstromübertragungen bei großen Leistungen auch für kürzere Entfernungen wettbewerbsfähig werden können. Man hätte dann die Wahl zwischen dem „Drehstromverbund“ und dem „Gleichstromverbund“, wie man vielleicht kurz sagen kann, oder einer der verschiedenen in Betracht kommenden gemischten Verfahren. Soweit heute zu übersehen ist, haben sie alle ihre Vor- und Nachteile, so daß keines den unbedingten Vorzug vor den anderen verdienen wird. Deshalb müssen alle ganz unvoreingenommen systematisch untersucht und, soweit es sich machen läßt, auch praktisch erprobt werden. Nur so wird man schließlich ohne Umwege und Zeitverluste die beste Lösung finden können.

Zusammenfassung

Als Beitrag zur Schaffung eines europäischen Verbundbetriebes werden im Anschluß an die Theorie der Drehzahlregelung alle für die atopische und die topische Netzregelung in Betracht kommenden Regel- und Steuergrößen nacheinander einer näheren Untersuchung unterzogen, auch wenn sie zur Zeit oder in nächster Zukunft wahrscheinlich noch keine praktische Bedeutung erlangen. Zum Schluß wird auch noch auf die Möglichkeit hingewiesen, den Verbundbetrieb mit Hilfe von Gleichstrom-Höchstspannungsübertragungen durchzuführen.

Schrifttum

- [1] Wüster, E.: Die internationale Angleichung der Fachausdrücke. ETZ-A Bd. 80 (1959) S. 550–552.
- [2] Regelungstechnik — Benennungen, Begriffe. DIN 19 226, Januar 1954.
- [3] Warren, H. E.: USA-Patentschrift Nr. 1 483 536 v. 27. 2. 1922. (Gangregelung einzelner Maschinen.)
- [4] Warren, H. E.: USA-Patentschrift Nr. 1 906 439 v. 8. 1. 1929 sowie die entsprechende Deutsche Patentschrift Nr. 591 765 v. 9. 1. 1930 der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft. (Frequenzintegralregelung zur Konstanzhaltung der Frequenz und Aufspeicherung der Integralfehlers.)
- [5] Graner, H.: Übersicht über die Hauptanwendungsformen der Netzkennlinienregelung. Elektr.-Wirtsch. Bd. 53 (1954) S. 376–380.
- [6] Graner, H.: Übersicht über die Sonderformen und Ausführungsarten der Netzkennlinienregelung. Elektr.-Wirtsch. Bd. 55 (1956) S. 677–685.
- [7] Graner, H.: Die Verwindungs- oder Torsionsregelung für große Netze und Netzverbände. ETZ-A Bd. 80 (1959) S. 52–57.
- [8] Curtis, T. E.: Power system governing. Electr. Engng. Bd. 66 (1947) S. 1197–1200.
- [9] Curtis, T. E., u. Pickslay, W. M.: Preliminary considerations of system-wide load division by means of accurate time control. Trans. Amer. Inst. electr. Eng. Bd. 67 (1948) Teil 2, S. 1562–1570.
- [10] Graner, H.: Das Richtvektorverfahren zur Leistungs-, Frequenz- und Uhrzeitregelung in großen Netzen (Drehungsregelung). ETZ Bd. 71 (1950) S. 341–344 u. 365–368.
- [11] Domanski, B. I., u. Jurewitsch, E. I.: Zur Leistungs- und Frequenzregelung in großen Netzen. Elektritschestwo Bd. 1954, H. 2, S. 3–7. (Übersetzung: Arch. Energiewirtsch. ZD Nr. 12/55.)
- [12] Schöpflin, H.: Leistungsregelung von Turbogeneratoren. (Fachreferat der 4. Jahrestagung der Elektrotechnik in Weimar 1952.) Auszug: Dt. Elektrotechn. Bd. 7 (1953) S. 447–448.
- [13] Mathias, A.: Kraftübertragung mit hochgespanntem Gleichstrom. ETZ Bd. 56 (1953) S. 601–608.
- [14] Löbl, O.: Gleichstromübertragung. Abschnitt in „Großraum-Verbundwirtschaft“, West-Verlag, Essen/Kettwig 1948.
- [15] Menge, A.: Die Energieversorgung des mitteleuropäischen Raumes durch hochgespannten Gleichstrom. ETZ Bd. 69 (1948) S. 37–44 u. 83–89.
- [16] Leonhard, A.: Elektrische Energieübertragung auf große Entfernungen. Arch. elektr. Übertr. Bd. 2 (1948) S. 272–285 u. Bd. 3 (1949) S. 329–337.
- [17] Roser, H.: Die Lage Westdeutschlands im europäischen Verbundnetz. Energiewirtsch. Tagesfr. Bd. 9 (1959/60) S. 158–162.

Tagung über Hochspannungsschalttechnik und Hochspannungsschalter im September 1959 in Prag

DK 061.3 : 621.3.027.3(437.11)

Vom 10. bis 12. September 1959 veranstaltete die Tschechoslowakische Wissenschaftlich-Technische Gesellschaft in Prag aus Anlaß der ersten internationalen Messe in Brünn ein internationales Symposium über die Hochspannungsschalttechnik und über Hochspannungsschalter. Sie hatte hierzu persönliche Einladungen an Fachleute der europäischen Länder ergehen lassen. Es fanden sich 55 Fachleute aus 12 Ländern zusammen, so daß der Kreis für eine anregende und fruchtbare Aussprache nicht zu groß war. Dank der ausgezeichneten Vorbereitung verlief das vorgesehene Programm zu aller Zufriedenheit, wozu besonders die hervorragende Simultanübersetzung beigetragen hat. Jeder Redner konnte in seiner Muttersprache sprechen; es wurde in Deutsch, Englisch, Französisch, Tschechisch und Russisch übertragen. Referate wurden von 20 Teilnehmern aus 9 Ländern gehalten. Zur Vorbereitung der Aussprache waren sie vor der Tagung den Teilnehmern zugestellt worden. Somit lag ein umfangreiches Programm für 2½ Tage vor, das aber doch eingehend diskutiert werden konnte.

Über direkte Hochleistungsprüfungen von Schaltern berichteten Zajíc (CSR), Baron (Frankreich) und Gert (CSR). Zajíc gab einen Überblick über die Erkenntnisse und Erfahrungen, die im Hochleistungsprüffeld Běchovice der CSR gewonnen worden sind. Gleichstrom-Schnellschalter werden ebenfalls mit Wechselstrom, aber bei verminderter Frequenz geprüft. Für die Prüfung von Hochleistungssicherungen kleiner Nennstromstärke, aber bei großen Abschaltleistungen wird hingegen ein Schwingkreis mit höherer Frequenz verwendet. Baron betrachtete die verschiedenen Arten von Fehlern im Netz und zog daraus die Folgerungen für die Beanspruchung bei der Prüfung. Insbesondere wies er auf den kilometrischen Fehler hin. Gert gab einen Überblick über die zahlreichen Untersuchungen mit Schaltern in den tschechoslowakischen Netzen.

Eingehend wurde über die Nachströme bei Kurzschlußabschaltungen nach Berichten von Mason

(England) und Blase (Belgien) diskutiert. Man kam zu dem Ergebnis, daß man zwar bei einem bekannten Schaltertyp auf Grund des Nachstromes einige Aussagen über dessen Leistungsfähigkeit machen kann, daß aber die Grenzen der Schaltleistung sich doch noch nicht allgemein aus derartigen Messungen ermitteln lassen.

Die verschiedenen Prüfverfahren für Schalter am Netz, im Maschinenprüffeld und die synthetischen Methoden wurden von Young (England) kritisch untersucht. Jedes Verfahren hat seine Grenzen. Young setzte sich sehr für die gleichwertige Anerkennung gewisser synthetischer Methoden ein. Hierzu berichteten Hochrainer (Deutschland) und Kaplan (Rußland) über die in Hochleistungsinstituten ihrer Länder verwendeten synthetischen Schaltungen für Druckluftschalter. Während nach Hochrainer der Kurzschlußstrom für die Erzeugung des Lichtbogens im Schalter einem Generator entnommen wird, kann nach Kaplan dieser Strom auch durch einen Schwingungskreis mit großer Kondensatorbatterie erzeugt werden. In beiden Fällen wird kurz vor dem Nulldurchgang des Stromes ein Schwingungskreis mit höherer Frequenz aufgeschaltet, damit man die Netzbedingungen beim Erlöschen des Lichtbogens im Stromnulldurchgang erhält. Hochrainer hat auch Vorschläge zur Verwendung einer solchen Ersatzschaltung für die Prüfung ölärmer Schalter gemacht.

Das Schalten kapazitiver und induktiver Ströme, wozu Berichte von Novotný und Pánek (CSR) und Catenacci (Italien) vorlagen, war Gegenstand einer lebhaften Aussprache. Das Problem besteht darin, ein geeignetes Kriterium für die Beurteilung des Schalters gegenüber derartigen Beanspruchungen zu finden. Man kam zu der Auffassung, daß die Überspannung allein kein Maßstab ist, da sie auch mit durch den Prüfkreis selbst bedingt ist. Es wurde als wünschenswert angesehen, daß die IEC bald Empfehlungen für ein geeignetes allgemein anerkanntes Prüfverfahren aufstellt. Interessant war der Bericht von Černýšev

(Rußland) über eine Ersatzschaltung zur Prüfung des Abschaltens unbelasteter Leitungen.

Artbauer (CSR) gab einen Überblick über eine Untersuchung der zulässigen Wärmebeanspruchung von Schaltgeräten bei Kurzschlüssen. Drei Referate befaßten sich mit der Ausführung und den Eigenschaften der Schalter, die in der Tschechoslowakei gebaut werden. Fernier sprach über französische und Butkevič über russische Schalterkonstruktionen. Zum Schluß der Tagung berichteten noch Foit (CSR), Myslicki (Polen) und Hortopan (Rumänien) über einige Ausrüstungen der Prüffelder ihrer Länder.

Anschließend an das Symposium hatten die Teilnehmer Gelegenheit, das Hochleistungs- und Hochspannungsprüffeld der CSR in Běchovice bei Prag zu besichtigen. Dieses Institut untersteht dem Ministerium für Schwerindustrie und kann Typen-Zertifikate ausstellen, die als öffentliche Urkunden anerkannt sind.

Das Hochleistungsinstitut verfügt über 2 Generatoren mit einer theoretischen Leistung an den Klemmen von je

2500 MVA, d. h. von zusammen 5000 MVA. Die ausnutzbare Leistung beträgt dreiphasig 3000 MVA bei Spannungen bis 290 kV und einphasig 1500 MVA bei Spannungen bis 420 kV. Das Institut verfügt über alle neuzeitlichen Versuchs- und Meßeinrichtungen.

Im Hochspannungsprüffeld steht eine dreistufige Kaskade für Wechselspannung von 2250 kV bei 1 A. Die drei Transformatoren ergeben in Sternschaltung eine Dreiphasen-Spannung von 1300 kV. Es sind aber auch andere Schaltungsmöglichkeiten vorgesehen, damit man größere Ströme bei geringerer Spannung erhalten kann. Der große Stoßgenerator hat eine Nennspannung von 3200 kV bei einer Energie von 76 kW. Daneben befinden sich noch kleinere Anlagen. Auch meßtechnisch ist das Institut ausgezeichnet ausgerüstet. Eine Drehstrom-Freileitung für 380 kV kann direkt in die Halle eingeführt werden.

An den wissenschaftlichen Teil der Tagung schloß sich noch eine Besichtigung von Kraftwerken und der Industrie-messe in Brünn an sowie eine Fahrt in die Hohe Tatra.
H. Baatz

Mehrphasenwattmeter, beruhend auf der magnetischen Widerstandsänderung von Halbleitern

DK 621.317.784.025.4 : 621.315.592

Nachdem bereits in früheren Veröffentlichungen über Mehrphasenwattmeter berichtet wurde, in denen der Halleffekt an den halbleitenden Verbindungen Indiumantimonid und Indiumarsenid untersucht wurde, werden nunmehr die Untersuchungen auf die Anwendung des Gaußeffekts ausgedehnt, d. h. auf die nach C. F. Gauß benannte Widerstandsänderung eines Halbleiterplättchens, wenn ein transversales magnetisches Feld angelegt wird¹⁾.

Die günstigsten Bedingungen werden errechnet und geeignete Schaltungen angegeben, die erforderlich sind, um Einphasenwattmeter für Wirkleistung, Blindleistung und Scheinleistung und Mehrphasenwattmeter (Wirkleistung, Blindleistung) mit Hilfe des Gaußeffekts herzustellen. Als Beispiel für die Einfachheit der Anordnung zeigt Bild 1 die Schaltung zur Messung der Wirkleistung in einem Drehstromnetz mit Nulleiter. Die Gleichspannung U_g , die aus der Reihenschaltung der drei Halbleiterplättchen 4 entnommen wird, ist proportional der Wirkleistung. Wie die Schaltung zeigt, werden in den Meßstromkreisen außer den Halbleiterplättchen nur einige wenige Schaltelemente, darunter eine Spule mit Permalloy-Kern und ein permanenter Magnet benötigt.

Die Halbleiterplättchen 4 werden von den Spannungswandlern 1 jeweils über einen Reihenwiderstand R und einen Kondensator C gespeist. Der Widerstand R muß gegen den Widerstand des Plättchens groß sein und der Bedingung $\omega RC \gg 1$ genügen. Dadurch ist der Strom durch jedes Plättchen vom Widerstand dieses Plättchens unabhängig sowie proportional und gleichphasig mit der zugehörigen Sternspannung. Die magnetische Wechselflußdichte, die durch die Spule 2 erzeugt wird und in der sich das Plättchen 4 befindet, ist proportional dem Leiterstrom und überlagert sich der konstanten Flußdichte des Permanentmagneten 3. Die resultierende Gleichspannung U_g der Halbleiterplättchen wird mittels eines hochohmigen Spannungsvoltmeters gemessen.

Da die Halbleiter mehr oder weniger temperaturempfindlich sind, werden auch die Möglichkeiten untersucht, die Temperatureinflüsse zu kompensieren. Zu diesem Zweck werden ein Vorwiderstand mit dem gleichen Temperaturverhalten wie das Plättchen und ein nahezu temperatur-unabhängiger Nebenwiderstand eingebaut. Es gelingt, inner-

halb eines bestimmten Temperaturbereiches, z. B. zwischen -20 bis $+60^\circ\text{C}$, die Messung temperaturunabhängig zu machen. Ferner wird die Größenordnung der Gleichspannung am Halbleiterplättchen untersucht, und es werden Hinweise auf Verbesserungen im Frequenzverhalten gegeben.

Bemerkenswert ist, daß die Verfasser auch bei hohen Frequenzen günstige Meßergebnisse mit ihrem Verfahren hatten. Bis 10 MHz ist die Frequenzabhängigkeit vom Plättchenwiderstand noch sehr gering, und es wird in Aus-

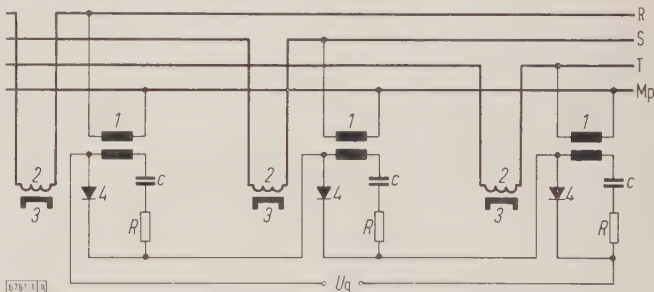


Bild 1. Schaltung zur Messung der Wirkleistung in einem Drehstromnetz mit Nulleiter mit Hilfe von Halbleiterplättchen.
1 Spannungswandler 3 Dauermagnet
2 Spule mit Permalloy-Kern 4 Halbleiterplättchen

sicht gestellt, daß durch geeignete Formgebung des Plättchens die Grenze bis 10 MHz einwandfrei zu erreichen ist, wahrscheinlich sogar bis 300 MHz erweitert werden kann.

Ein Vergleich mit den Wattmetern nach dem Halleffekt zeigt, daß die „Gaußwattmeter“ im Aufwand einfacher und die „Gaußplättchen“ in Anbetracht der halben Kontaktzahl besser herzustellen sind, wobei auch die Symmetrieforderungen bei den „Hallplättchen“ wegfallen. Auch bei hohen Frequenzen bilden die Gaußplättchen hinsichtlich der Erdung geringere Schwierigkeiten.

Diese grundlegenden Untersuchungen werden für diejenigen von großem Interesse sein, die sich mit exakter Leistungsmessung befassen. Besonders für das Hochfrequenzgebiet bahnt sich damit ein neuer Weg an, der alle bisher gegebenen Möglichkeiten weit überflügelt.
Tr

1) Strutt, M. J. O., u. Sun, S. F.: Bull. Schweiz. elektrotechn. Ver. Bd. 50 (1959) S. 452–458; 10 B., 6 Qu.

RUNDSCHAU

DK 621.315.027.8

Höchstspannungs-Energieübertragung. Nach Goldstein, A., u. Frey, W.: Brown-Boveri-Mitt. Bd. 46 (1959) S. 227–250; 23 B., 2 Taf., 11 Qu.

In der Arbeit wird die Vorstudie eines Projekts für eine Übertragung von 2000 MW mit einer höchsten Dreiecksspannung von 650 kV über eine Entfernung von 1300 km beschrieben. Danach soll die Leistung von neun Wasserkraftgeneratoren in drei Gruppen von jeweils drei dreisäuligen Einphasentransformatoren (600 MVA, 20/600 kV) hochgespannt und von zwei 960 bzw. 1300 km entfernten Stationen über mehrere Gruppen von Spartransformatoren (3×200 MVA) in 230-kV-Netze geliefert werden. Die Leistung soll auf zwei voneinander unabhängigen, mit je einem Vierbündelsystem belegten Stahl-Aluminium-Leitungen (480 mm^2), deren natürliche Leistung 1550 MW je System beträgt, übertragen werden. Messungen in der Versuchsstation Däniken haben ergeben, daß bei der berechneten mittleren Feldstärke von $14,8 \text{ kV/cm}$ die Koronaverluste bei trockenem Wetter mit $0,72 \text{ kW/km}$ je System niedriger lagen, als nach den Ergebnissen der 400-kV-Forschungsgemeinschaft in Heidelberg zu erwarten war. Die Ursache hierfür wird in der verschiedenen Oberflächenbeschaffenheit der Leiter gesehen.

Bei der Wahl des Isolationsniveaus dieser Übertragung sind die verhältnismäßig niedrigen Werte der Prüfspannungen bemerkenswert. Als Stehstoßspannung sind 2 MV, als Prüfwechselspannung für die Olisolation nur 880 kV vorgesehen. Diese Werte dürften nur bei weitgehender Begrenzung der Schaltüberspannungen und einem sehr sicheren Ableiterschutz zu vertreten sein.

Zur Wahrung der Stabilität und zur Beherrschung netzfrequenter Überspannungen sind Kompensationsmaßnahmen unbedingt erforderlich. Da die Leitungen durch unbewohnte Gegenden führen, werden die Batterien der Reihenkondensatoren in den Stationen konzentriert. Im Erzeugungszentrum werden Kondensatoren mit einer Blindleistung von 60 MVA, in der Zwischenstation mit 60 bzw. 20 MVA und in der Endstation mit 20 MVA aufgestellt. Eine interessante Lösung wurde für die Anordnung der notwendigen Paralleldrosselspulen gefunden. Diese werden nicht, wie meistens üblich, an die Tertiärwicklungen der Stationstransformatoren angeschlossen, sondern auf der Leitungsseite der Reihenkondensatoren angeordnet. Zwei Gründe sprechen für diese Wahl. Einmal würden die Sammelschienenspannungen ohne Querdrosseln auf der Leitungsseite bei dem zunächst vorgesehenen Betrieb der Leitungen mit einer weit geringeren Übertragungsleistung als der entsprechenden natürlichen Leistung — bedingt durch die vor-eilenden Ströme an den Leitungsenden — höher als die leitungsseitigen Spannungen sein. Die Ursache hierfür ist der Spannungsabfall in den Reihenkondensatoren. Zum anderen entgeht man der Gefahr, daß bei Unterbrechungen in den Stationen auch die Querdrosseln abgetrennt werden und somit die frei werdenden großen Blindleistungen von mehr als 3000 MVA Überspannungen von mehr als 1000 kV zur Folge hätten.

Netzmodellversuche haben ergeben, daß trotz der beschriebenen Kompensationsmaßnahmen die Stabilität bei einphasigem Erdschluß, dreiphasiger Abschaltung und einer nach 0,25 s folgenden Schnellwiedereinschaltung gerade noch gewährleistet ist. Dies gilt, obwohl während der Störungsdauer 80% der Leistung über den fehlerfrei gebliebenen zweiten Leitungsstrang transportiert wird. Hierbei wirkt sich das Fehlen zusätzlicher, in Kraftwerksnähe gelegener Verbraucher aus.

Der Einfluß der Querdrosseln und Reihenkondensatoren und die verhältnismäßig lange Leitung erfordern eine genaue Ermittlung der für die Einstellung des Schnelldistanzschutzes gültigen Impedanzwerte mit Hilfe der Telegraphengleichungen. Unter Einbeziehung einer Hochfrequenzkupplung wird die Abschaltung des gestörten Leitungsteils in der Grundzeit sichergestellt. Geräte und Stationsmaterial für diese Übertragung werden von der bekannten 400-kV-Technik abgeleitet, wozu man sich auf Grund der guten Erfahrungen berechtigt glaubt.

Schder

DK 621.317.333 : 621.313.12

Das Deltaohmmeter, ein neues Gerät zur Messung des Isolationszustandes von Ständern großer Generatoren. (Un nouvel appareil d'essai des isolations statoriques des grands alternateurs: le deltaohmmètre.) Nach Fabre, J.: Rev. gen. Electr. Bd. 68 (1959) S. 217–223; 6 B., 1 Taf., 4 Qu.

Die Messung des Isolationswiderstandes bei hohen Gleichspannungen, die z. B. für die Beurteilung des Isolationszustandes der Wicklungen großer Synchronmaschinen erforderlich ist, stößt bekanntlich auf eine grundsätzliche Schwierigkeit: der der Spannung und dem Isolationswiderstand entsprechende Leitungsstrom (Gleichstrom) i_c wird überlagert von dem durch die Rückstands-bildung im Dielektrikum bedingten Strom. Nach Anlegen einer Gleichspannung an einen festen Isolator nimmt der Gesamtstrom $i(t)$ allmählich ab und nähert sich asymptotisch dem Leitungsstrom i_c . Die Zeitkurve des Rückstandsstroms im logarithmischen Koordinatensystem verläuft im ersten Teil geradlinig und hat nach einer gekrümmten Übergangszone mit anderer Neigung wieder linearen Verlauf. Bezieht man sich auf den ersten Teil der Kurve, so kann der Gesamtstrom dargestellt werden durch die Gleichung $i(t) = i_c + k t^n$, in der t die Zeit und k eine Konstante ist. Der Exponent n ist während einer Periode, die im allgemeinen größer als eine Stunde ist, kleiner als 1, wird jedoch nach Ablauf der Übergangszone größer als 1. Diese Beziehungen wurden experimentell an einer großen Zahl von Isolierstoffen für Zeiten von 0,01 s bis 20 h bestätigt.

Bereits in einer früheren Veröffentlichung [Rev. gen. Electr. Bd. 67 (1958) S. 105–113] hat der Verfasser für die Bestimmung des Leitungsstroms in seiner Abhängigkeit von der angelegten Spannung das folgende Verfahren vorgeschlagen: Eine Spannung wird während einer genügend langen Zeit (nicht über 50 min) an die zu messende Isolierung angelegt. Drei Werte (i_1, i_2, i_3) des Gesamtstroms werden aus dem ersten Teil der Kurve gemessen. Unter der Voraussetzung, daß die diesen Strömen entsprechenden Zeiten t_1, t_2, t_3 eine geometrische Reihe bilden, erhält man

$$i_c = \frac{i_1 \cdot i_3 - i_2^2}{i_1 + i_3 - 2 i_2}$$

Trägt man nun $i_1 - i_c, i_2 - i_c$ und $i_3 - i_c$, d. h. die Werte des Rückstandsstroms, in Abhängigkeit von t_1, t_2, t_3 im logarithmischen Koordinatensystem auf, so muß die Verbindung der drei Punkte eine gerade Linie ergeben.

Ist das nicht der Fall, so ist die Methode nicht anwendbar. Die Neigung der Geraden entspricht dem Exponenten n ; er ist von der Spannung unabhängig und wird für alle Messungen bei anderen Spannungen als konstant angesehen. Weiter wird aus der ersten sich über etwa 50 min erstreckenden Messung der Koeffizient k im absoluten Wert bestimmt. Er ändert sich mit der Spannung, muß also für jeden Spannungswert ermittelt werden. Mit der Kenntnis des Werts k für die erste Messung genügt es jedoch, einen ihm proportionalen Wert zu ermitteln, um den Charakter seiner Abhängigkeit von der Spannung festzustellen. Zu diesem Zweck werden bei jeder Spannungsstufe sehr kurzzeitige Veränderungen der Spannung um etwa 100 V durchgeführt. Die diesen entsprechenden Rückstandsströme werden nach einer „pseudo-ballistischen“ Methode mit Hilfe eines Galvanometers von geeigneter Schwingungsdauer gemessen, das während des Bruchteils einer Sekunde in den Meßkreis eingeschaltet wird.

Die einzelnen Meßvorgänge werden durch ein System von zwei Relais gesteuert und selbsttätig durchgeführt. Aus der Kurve des Rückstandsstroms und dem aus der pseudo-ballistischen Methode erhaltenen, dem Koeffizienten k proportionalen Wert läßt sich nun der Einfluß des Rückstandsstroms bei der Ermittlung von i_c eliminieren. Die genaue Bestimmung des für jede Spannungsstufe charakteristischen Leitungsstroms i_c setzt voraus, daß von dem ermittelten Gesamtstrom die Summe der Rückstandsströme abgezogen

wird, die bei den vorangehenden Spannungsstufen gemessen wurden.

Das verwickelt erscheinende Verfahren wird durch eine Meßanordnung vereinfacht, die vom Verfasser als Deltaohmmeter bezeichnet wird. Sie besteht aus einem elektrostatischen Generator für hohe stabilisierte Gleichspannungen, aus einem Spannungsvariator, mit dessen Hilfe die erwähnten kleinen Spannungsänderungen zur Bestimmung der dem Koeffizienten k proportionalen Größen erzeugt werden, und aus einem Programmregler zur selbsttätigen Durchführung der pseudo-ballistischen Messungen, der im wesentlichen zwei Thyratrons und vier Relais enthält.

Nach Angabe des Verfassers ist es möglich, mit Hilfe der Meßanordnung alle Messungen für Spannungen bis 20 kV in 10 Stufen innerhalb einer Zeit von weniger als 2 h durchzuführen. Ein Vergleich der nach dem beschriebenen Verfahren durchgeführten Messungen mit dem aus der direkten Methode (Messung von i_c nach vollständigem Abklingen des Rückstroms) erhaltenen Ergebnis zeigte eine vorzügliche Übereinstimmung. Sct

DK 621.365.55

Dielektrische Erwärmung mit 915-MHz-Mikrowellen. (Rapid heating of dielectric materials at 915 Mc.) Nach *Feiker, G. E.*, u. *Gittinger, N. C.*: Trans. Amer. Inst. electr. Eng. (II) (1959) S. 35–39; 13 B., 1 Qu.

Bei der dielektrischen Erwärmung kommt es in erster Linie auf hohen spezifischen Leistungsumsatz an, da dieser für die benötigte Erwärmungszeit maßgebend ist. Frequenz, Verlustfaktor des Werkstoffes und elektrische Feldstärke sind hierbei die bestimmenden Größen, von denen nur die erstgenannte im allgemeinen Fall wählbar ist. Man ist bestrebt, mit möglichst hoher Betriebsfrequenz zu arbeiten, kommt jedoch dabei bald an eine Grenze, die durch die in der Regel geforderte Gleichmäßigkeit der Erwärmung innerhalb des ganzen Objekts gegeben ist, und benötigt Generatoren mit hoher Dauerstrichleistung und Betriebssicherheit. Hinzu kommt, daß zur einwandfreien Beherrschung dielektrischer Erwärmungsvorgänge und insbesondere für die schwierige Anpassung die Dielektrizitätskonstante und der Verlustfaktor des Werkstoffes hinsichtlich ihrer Temperaturabhängigkeit genau bekannt sein müssen.

Zu allen derartigen Fragen leistet die Arbeit einen bemerkenswerten Beitrag. Es wird eine Versuchsanordnung beschrieben, die als Generator ein in den letzten Jahren entwickeltes Hochleistungs-Dauerstrichmagnetron (Typ GL—6787) verwendet, das mit einer Frequenz von 915 MHz arbeitet. Das Objekt befindet sich in einem abstimmbaren Hohlraumresonator und kann während der Aufheizung mittels eines abgeschirmten Thermoelements temperaturmäßig genau überwacht werden. Dadurch war es den Verfassern möglich, die sonst schwer zu ermittelnden Änderungen des Verlustfaktors mit der Temperatur meßtechnisch zu erfassen. Gegenüber den bisher fast ausschließlich verwendeten Frequenzen von etwa 40 bis 100 MHz bringt die Steigerung der Frequenz um mindestens den Faktor 9 bei den üblichen Werkstoffen eine Verkürzung der Erwärmungszeit und ermöglicht andererseits erst, eine Reihe besondersverlustarmer Stoffe (z. B. Teflon 100 X, Fluorothene, Styrene, Glas, Phenol-Verbundmassen) dielektrisch zu erwärmen.

Für zahlreiche neuzeitliche Kunststoffe und Isolierstoffe sind in einer Tafel Meßwerte der Dielektrizitätskonstante, des Verlustfaktors und des Leistungsfaktors zusammengestellt, aus denen der Erfolg einer Behandlung mit 70 bzw. 915 MHz hervorgeht. Bei diesen Frequenzen ist eine ausreichende Erwärmung nur bis zu einem Grenzwert des Verlustfaktors von etwa 0,01 möglich; Stoffe mit einem Verlustfaktor unterhalb von etwa 0,001 können auch bei 915 MHz nicht dielektrisch erwärmt werden. Für eine Phenol-Verbundmasse (General Electric 12900) werden eine Anzahl aufschlußreicher Diagramme angegeben, aus denen die wesentlichen Kenngrößen und ihre Zusammenhänge hervorgehen; erwähnt sei vor allem die Darstellung der Resonator-Impedanz als Funktion der Temperatur des Objekts (Smith-Diagramme). Abschließend wird auf die Ursachen ungleichmäßiger Erwärmung der Proben und auf Anpassungsfragen eingegangen. Fs

DK 621.385.3.029.64

Eine Scheibentriode in Metall-Keramik-Bauweise für Frequenzen bis 6000 MHz. Nach *Mentzel, E.*, u. *Stietzel, H.*: Philips techn. Rdsch. Bd. 20 (1958/59) S. 312–317; 9 B., 2 Taf., 2 Qu.

Im Vergleich mit Metall-Glas-Röhren können durch die Metall-Keramik-Bauweise die Ausgangsleistung und die Grenzfrequenz gittergesteuerter Röhren heraufgesetzt werden. Die beschriebene Röhre, Typ OZ 92, ist in erster Linie als Leistungsverstärker für das G-Band (3950 bis 5850 MHz) gedacht, kann aber auch in Oszillatorschaltung bis 6000 MHz betrieben werden und gibt dann bei 5000 MHz etwa 13 W, bei 5500 MHz etwa 7 W Ausgangsleistung ab mit einem Wirkungsgrad von 9% bzw. 7%. Bei einer Anodenspannung von 500 V beträgt die Anodenverlustleistung 125 W; die ihr entsprechende Wärme kann sowohl durch Kühlung mit Wasser als auch mit Druckluft abgeführt werden.

Da bei Scheibentrioden für hohe Frequenzen stets die Resonanzhohlräume mit dem Röhrensystem zusammen eine Einheit bilden, beeinflusst die Form der Röhrenumhüllung die Abstimm-Möglichkeit. Die äußeren Abmessungen sind so gewählt, daß die Röhre in die gebräuchlichen Leitungsprofile eingebaut werden kann, daß der Hohlraumresonator in seiner Grundschwingung arbeitet und daß das Verhältnis der den Hochfrequenzstrom führenden Oberfläche der Röhrenumhüllung zur Gesamtoberfläche des Hohlraumresonators durch Vermeiden von Ecken, Blechen und ähnlichen Inhomogenitäten so klein wie möglich ist. Im vorliegenden Fall hat der Hohlraumresonator eine Grenzfrequenz von 6500 MHz. Als Metallpartner der aus einer Aluminiumoxyd-Keramik bestehenden Röhrenumhüllung wird eine Eisen-Nickel-Kobalt-Legierung mit fast gleichem Ausdehnungskoeffizienten benutzt, deren hohe Leitungsverluste durch Vergolden der Oberfläche (3 bis 5 μ m) ausgeschaltet werden, so daß bei 5000 MHz Gütewerte um 500, d. h. das Doppelte der Glas-Metall-Bauweise erreicht werden.

Der besondere Vorteil der Keramik-Bauweise liegt nicht nur in der hohen thermischen Belastbarkeit der Röhre wegen der großen Wärmeleitfähigkeit der Keramik, bei der auch bei höheren Temperaturen keine Elektrolyse auftritt, sondern vor allem in der guten Maßhaltigkeit der Keramik infolge des Fehlens eines plastischen Zustandes im Temperaturbereich bis 1000 °C. Dies ermöglicht eine besonders einfache Konstruktion und eine Herstellung der Röhre aus insgesamt nur 15 Einzelteilen. Als Lötmetalle dienen Silber oder Silberlegierungen mit Kupfer und anderen Metallen. Fri

DK 621.372.823.2.09

Über die Übertragung der TE_{01} -Welle in spiraligen Hohlleitern. (The transmission of TE_{01} wave in helix waveguides.) Nach *Hosono, T.*, u. *Kohna, S.*: Trans. Inst. Radio Eng. on Microwave Theory and Techn. Bd. 7 (1959) S. 370 bis 373; 9 B., 1 Taf., 10 Qu.

In der Arbeit werden die Beziehungen zwischen den Übertragungseigenschaften eines spiralförmigen Hohlleiters und seinem Oberflächen-Wellenwiderstand beschrieben. In dem untersuchten Bereich sind einfache Näherungsformeln wegen der Größe des Wellenwiderstandes nicht anwendbar. Die Beziehungen zwischen dem anisotropen Oberflächen-Wellenwiderstand und der Dämpfungskonstante werden untersucht, damit man den besten Widerstandswert für ein Filter ermitteln kann.

Es zeigt sich, daß viele unerwünschte Moden in dem TE_{01} -Hohlleiter möglich sind. Praktisch kommen jedoch nur die TM_0 -, HY_1 - und HY_2 -Mode in Betracht, für die eine numerische Berechnung durchgeführt wird. Hierbei wird jeweils diejenige Mode mit der minimalen Dämpfung für jeden gegebenen Wellenwiderstand gewählt. Die ermittelten Werte gleicher Dämpfung werden in einem Diagramm komplexen Wellenwiderstandes miteinander verbunden und der maximale Wert dieser Minimaldämpfung ermittelt.

Für z. B. die TM_0 -Mode, die in einem spiraligen Hohlleiter mit 50 mm Dmr. bei 50 kHz übertragen wird, beträgt dieser Dämpfungswert etwa 8 N/m. Der entsprechende Wellenwiderstand beträgt (57,6 – j 28,8) Ω . Die Dämpfungskonstanten aller TM_0 -Moden können bei diesem optimalen Wellenwiderstand nicht kleiner als der angegebene Dämpfungswert sein. Am Schluß des Aufsatzes wird der Aufbau zweier Hohlleiter angegeben, mit denen der ermittelte Wellenwiderstand erreicht werden kann. Thr

VERBANDSNACHRICHTEN

VDE

Verband Deutscher Elektrotechniker

Frankfurt a. M., Osthafenplatz 6

Fernruf: 4 31 57; Fernschreiber (Telex): 04-12 871;

Telegramm-Kurzanschrift: Elektrobund;

Postscheckkonto: Frankfurt a. M. 388 68.

Inkraftsetzung von VDE 0879, Teil 1/3.60 „Regeln für die Fern-Entstörung der Hochspannungs-Zündanlagen von Otto-Motoren“

Gegen den in ETZ-A Bd. 80 (1959) S. 350 angekündigten Entwurf einer Neufassung von VDE 0879 Teil 1 sind lediglich Einsprüche gegen die Art der Kennzeichnung der Funk-Entstörmittel eingegangen. Diese wurden inzwischen ordnungsgemäß behandelt. Die entsprechend geänderten Regeln hat der Vorstand des VDE im Januar 1960 genehmigt und zum 1. März 1960 in Kraft gesetzt. Die bisherigen Richtlinien VDE 0879 Teil 1/1.58 werden am gleichen Tage ungültig.

Einzeldrucke der Neufassung können unter der Bezeichnung VDE 0879 Teil 1/3.60 vom VDE-Verlag, Berlin-Charlottenburg 2, Bismarckstraße 33, zum Preise von 0,60 DM bezogen werden.

Verband Deutscher Elektrotechniker

Der Generalsekretär

Lauster

Berichtigung des Entwurfes 2 der Änderung a zu VDE 0560 „Regeln für Kondensatoren“ Teil 1 „Allgemeine Bestimmungen“

In dem in ETZ-A Bd. 80 (1959) S. 769 angekündigten Entwurf VDE 0560 Teil 1 a/...59 ist in der Tafel 4 zu dem Kennbuchstaben G in der Spalte 2 die Zahl 65 durch die Zahl 85 zu ersetzen.

Der Vorsitzende des VDE-FNE-Gemeinschaftsausschusses „Kondensatoren“

Linder

VDE-Vorschriftenstelle

Weise

Nachrichtentechnische Gesellschaft im VDE

Frankfurt a. M., Osthafenplatz 6

Einladung zur Fachtagung „Mikrowellentechnik und Antennen“

Die NTG-Fachausschüsse 13 „Antennen“ (Leiter Abt.-Präs. Dipl.-Ing. A. Heilmann, Darmstadt) und 16 „Mikrowellentechnik“ (Leiter Prof. Dr. phil. H. Kaden, München) veranstalten in Zusammenarbeit mit dem Nachrichtentechnischen Verein München im VDE vom 27. bis 30. April 1960 eine Fachtagung über das Thema „Mikrowellentechnik und Antennen“.

Tagungsort: Technische Hochschule München, Hörsaal Nr. 508, Eingang Ecke Arcisstraße/Theresienstraße.

Folgende Veranstaltungen sind vorgesehen:

Vorträge

Mittwoch, 27. April 1960, 9.00 Uhr

Begrüßung durch den Vorsitzenden des Elektrotechnischen Vereins München, G. v. Ammon, München.

Eröffnung durch den Leiter des NTG-Fachausschusses 16 „Mikrowellentechnik“, H. Kaden, München.

Übersichtsvortrag: F. W. Gundlach, Berlin.

Stand und Zukunft der Mikrowellentechnik.

Diskussionsleiter: H. Kaden, München.

H. Severin, Hamburg: Neuere Mikrowellenferrite und ihre Anwendungen.

G. Schulten und H. Severin, Hamburg (vorgetragen von G. Schulten): Dämpfungsarme Leitungen für Millimeterwellen.

H. W. Fock, Berlin: Molekularverstärker.

Mittwoch, 27. April 1960, 15.00 Uhr

Diskussionsleiter: F. W. Gundlach, Berlin.

W. Haken, München: Geometriestörungen in H₀₁-Hohlleitern und ihre Auswirkungen auf die Übertragungsgüte.

E. F. Schelisch, Chelmsford, Essex (England): Meßmethoden für die Übertragungseigenschaften von Hohlleitern für die Fernübertragung mittels Millimeterwellen.

J. Deutsch, München: Breitbandige Resonanz-Richtungsleitungen mit kleinen Abmessungen für Dezimeterwellen.

E. Pivitt, Backnang: Reziproke und nichtreziproke Phasenschieber im Rechteckhohlleiter.

Chr. v. Haza-Radlitz, München: Vergleich der Eigenschaften von nach verschiedenen Prinzipien gebauten Richtungsgabeln.

Donnerstag, 28. April 1960, 15.00 Uhr

Diskussionsleiter: H. Döring, Aachen.

A. Kürzl, München: Bestimmung mehrerer Reflexionsstellen in Mikrowellen-Bauelementen.

G. Gebhard, Pforzheim: Überlagerungsmeßverfahren mit automatischem Frequenznachlauf für Mikrowellen.

H. Kuhn, Pforzheim: Eine Hohlleiterverzweigung und ihre Verwendung.

D. Girke und W. Schlotterbeck, Backnang, (vorgetragen von D. Girke): Antennenweichen für Richtfunk im 2-GHz-Bereich.

H. J. Butterweck, Aachen: Mikrowellenbandfilter unter Verwendung mehrerer Eigenschwingungen in einem Hohlraum.

Freitag, 29. April 1960, 9.00 Uhr

Diskussionsleiter: A. Heilmann, Darmstadt.

W. Stöhr, München, und O. Zinke, Darmstadt (vorgetragen von W. Stöhr): Wege zum optimalen Breitband-Dipol.

H. H. Meinke, München: Formen und Diagramme von Hochpaß-rundstrahlern.

A. Vlcek, Darmstadt: Vertikale Richtdiagramme von stabförmigen Rundstrahlern unter Berücksichtigung der Strahlungsdämpfung.

R. Greif, München: Die logarithmisch-periodische Antenne.

H. Ehrenspeck, Belmont, Mass. (USA): Die Backfire-Antenne, ein neuer Längsstrahler-Typ mit hoher Richtwirkung.

H. Brückmann, Little Silver, N. J. (USA): Hornstrahler für Funkweitverkehr auf Kurzwellen.

Freitag, 29. April 1960, 15.00 Uhr

Diskussionsleiter: O. Zinke, Darmstadt.

E. Schüttlöffel, Backnang: Eine neuartige Parabolantenne für Breitband-Richtfunk.

E. Gillitzer, München: Richtfunk-Antennenanlagen für Übertragung in zwei Polarisationsrichtungen.

R. Maunz und H. Brunner, Ulm (vorgetragen von R. Maunz): Antennen mit kosekans-förmigen Richtcharakteristiken.

A. Rupp und A. Schlaud, Ulm (vorgetragen von A. Rupp): Probleme der Zirkularpolarisation bei Radarantennen.

R. Huber, München: Speisung von Sendeantennen mit Hilfe von Goubauleitungen.

Besichtigungen

Donnerstag, 28. April 1960, 9.00 Uhr

Folgende Einrichtungen und Institute können besichtigt werden:

Institut für Hochfrequenztechnik der Technischen Hochschule München,

EVU-Sprechfunkeinrichtung des Störungsdienstes der Isar-Amperwerke AG; Bezirksleitung Miesbach,

EVU-Sprechfunkeinrichtung des Störungsdienstes der Isar-Amperwerke, AG; Bezirksleitung Dachau,

Ausstellung von Bauelementen der Antennen- und Hohlleitertechnik im Werk für Weitverkehrstechnik der Siemens & Halske AG, München,

Verkehrszentrale im Polizei-Präsidium München,

Fernmeldeturm der Deutschen Bundespost in München,

Flugsicherung auf dem Flughafen München-Riem,

Institut für Flugfunk und Mikrowellen der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt, Oberpfaffenhofen.

Für jede Besichtigung wird ein Unkostenbeitrag von 2,— DM erhoben, der in der Reihenfolge des Einganges gebucht wird. Da die Teilnehmerzahl für die einzelnen Besichtigungen begrenzt ist, bleibt die Zuweisung zu einer anderen als der bestellten Besichtigung vorbehalten.

Exkursion

Sonntag, 30. April 1960

Als Abschluß der Tagung wird eine Exkursion zur Zugspitze veranstaltet, in deren Verlauf einem kleinen Kreis der Teilnehmer die Möglichkeit zur Besichtigung der meteorologischen Station des Deutschen Wetterdienstes und von nachrichtentechnischen Einrichtungen der Deutschen Bundespost auf dem Zugspitzgipfel geboten werden kann.

7.45 Uhr Abfahrt der Omnibusse am Lenbachplatz in München zum Eibsee, von dort Weiterfahrt mit der Bayerischen Zugspitzbahn zum Schneefernerhaus, anschließend Auffahrt mit dem Seilift zum Zugspitzgipfel.

21.00 Uhr Voraussichtliche Rückkunft in München.

Der ermäßigte Fahrpreis für Omnibus, elektrische Bahn und Lift beträgt 28,— DM. Die Exkursion findet bei jedem Wetter (warme Kleidung, gutes Schuhwerk!) statt; daher können nur verbindliche Anmeldungen angenommen werden. Da die Teilnehmerzahl begrenzt ist, werden die zur Verfügung stehenden Teilnehmerkarten in der Reihenfolge des Eingangs der Fahrtkosten zugeteilt.

Am Vorabend der Tagung, also am Dienstag, dem 26. April 1960, ist abends ab 19.00 Uhr ein zwangloses Treffen der Tagungsteilnehmer im Haus des Sports, Briener Straße 32, vorgesehen.

Anmeldungen zum Besuch der Tagung und zur Teilnahme an den Besichtigungen sowie an der Exkursion sind bis zum 4. April 1960 an die Tagungsgeschäftsstelle (München, Briener Straße 40, Sekretariat Dir. Dipl.-Ing. G. v. Ammon) zu richten. NTG-Mitglieder und Studenten erhalten auf Grund ihrer Bestellung die Teilnehmerkarten für die Vortragsveranstaltungen kostenlos. Für Nichtmitglieder beträgt die Tagungsgebühr 10,— DM, um deren Überweisung auf das Postscheckkonto München Nr. 917 05 des Elektrotechnischen Vereins München gebeten wird. Die Unkostenbeiträge für die Besichtigungen und die Exkursion sind ebenfalls auf dieses Postscheckkonto zu überweisen. Die rechtzeitig bestellten und — soweit erforderlich — bezahlten Teilnehmerausweise werden den Teilnehmern durch die Post zugesandt; sonst liegen die Tagungsunterlagen in der Tagungsgeschäftsstelle zum Abholen bereit.

Allen NTG-Mitgliedern werden Vordrucke zur Tagungsanmeldung und zur Quartierbestellung durch die Post zugestellt. Sie können auch bei der Tagungsgeschäftsstelle angefordert werden.

Nachrichtentechnische Gesellschaft im VDE
Geschäftsführung
Burghoff

VERANSTALTUNGSKALENDER

Berlin: EV Berlin, Berlin-Charlottenburg 2, Bismarckstr. 33.

17. 2. 1960, 18.15, Techn. Universität, Hörsaal EB 301: „Das Zwei-Ortskurvenverfahren und seine Anwendung für die Behandlung verschiedener Regelungsprobleme“, Prof. Dr.-Ing. W. Oppelt, Darmstadt.

18. 2. 1960, 18.15, Techn. Universität, Hörsaal EB 301: „Selektivschutz in Industriennetzen“, Dipl.-Ing. F. W. Dörrenberg, Frankfurt a. M.

Biberach: ETV Württemberg, Stützpunkt Biberach, i. Hs. Elektrizitätsversorgung Schwaben.

16. 2. 1960, 17.00, EVS, Sitzungssaal, Biberach, Bahnhofstr. 19: „Überspannungsschutz durch Überspannungsableiter unter besonderer Berücksichtigung des Schutzes der Mittel- und Niederspannungsnetze“, Dipl.-Ing. E. Ohlig, Stuttgart.

Bremen: ETV Bremen, Delmestr. 86.

18. 2. 1960, 20.00, Stadtwerke Bremen, Schalthaus Mitte, Vortragsraum, Am Wall, Ansgarstr.: „Entwicklungsrichtungen der Radartechnik“, Dr. Stein, Bremen.

Düsseldorf: VDE-Bezirk Düsseldorf, Luisenstr. 105.

18. 2. 1960, 17.30, Metallgewerbl. Berufsschule, Redinghofenstr.: „Transistoren in der Steuerungs- und Regelungstechnik“, Dr.-Ing. W. Fritzsche, Berlin.

Erlangen: VDE-Bezirksverein Nordbayern, Stützpunkt Erlangen, Werner-von-Siemens-Str. 50.

25. 2. 1960, 19.30, Physikal. Inst. d. Universität, gr. Hörsaal, Glückstr. 6: „Das 6-GeV-Elektronen-Synchrotron in Hamburg“, Dr. H. O. Wüster, Hamburg-Bahrenfeld. Anschl. Mitgliederversammlung.

Hamburg: VDE-Bezirk Hamburg, Gerhart-Hauptmann-Platz 48.

25. 2. 1960, 17.30, Museum f. Völkerkunde, gr. Vortragssaal, Rothenbaumchaussee 64: „Erhöhung der Betriebssicherheit in Starkstromanlagen durch statistische Fehlerauswertung“, Dipl.-Ing. K. H. Lopitzsch, Mannheim.

Hannover: ETG Hannover, Bischofsholer Damm 70.

23. 2. 1960, 18.15, Techn. Hochschule, Hörsaal 42: „Prüfen und Messen mit Ultraschall (Mechanisierung und Registrierung) mit Vorführung“, Dipl.-Phys. W. Böhme, Karlsruhe.

Karlsruhe: ETV Mittelbaden, Karlsruhe, Kaiserallee 11.

23. 2. 1960, 19.15, Techn. Hochschule, Engelbert-Arnold-Hörsaal, Kaiserstraße 12: „Physikalisch-technische Grundlagen der Transduktor-Schaltungen und ihre Anwendungen“, Dipl.-Phys. H. Corder, Mannheim.

Kassel: VDE-Bezirksverein Kassel, Kassel-Bettenhausen, Lilienthalstr. 150.

25. 2. 1960, 18.00, Hessisches Landesmuseum, Hörsaal: „Die Steuerung der Bühnenbeleuchtungsanlage im Staatstheater Kassel“, Dipl.-Ing. Mosebach, Kassel.

Köln: VDE-Bezirk Köln, Köln-Riel, Amsterdamer Str. 192.

19. 2. 1960, 18.00, Staatl. Ingenieurschule, Ubierring 48: „Höchstspannungsschalter mit Löschluftspeicherung in den Schaltkammern“, Obering. R. Schulz, Frankfurt a. M.

Münster: ETV d. Rhein.-Westf. Industriebezirks, Essen, Stützpunkt Münster, Herwarthstr. 6–8.

18. 2. 1960, 19.30, Staatl. Ingenieurschule f. Bauwesen, Physiksaal, Münster, Eing. Latharingerstr.: „Elektrische Bausteine der Steuerungstechnik“, Obering. H. Brungsberg, Frankfurt a. M.

Neheim-Hüsten: VDE-Bezirk Berg. Land, Stützpunkt Neheim-Hüsten, Heidestr. 4, i. Hs. Lenze KG.

18. 2. 1960, 20.00, Hotel Egen, Mendener Str. 15: „Duroplastische Kunststoffe, Bewertung und Anwendung“, Dipl.-Phys. Weißler, Mannheim.

Oldenburg: VDE-Bezirk Oldenburg, Starklofstr. 3.

19. 2. 1960, 20.00, Lehrküche der Energieversorgung Weser-Ems-AG, Gartenstr. 8: „Die Fortschritte der modernen Naturwissenschaften und ihre Auswirkungen auf Ausweitung und Differenzierung der akademischen Berufe“, Prof. Dr.-Ing. W. Niens, Berlin.

Ravensburg: ETV Württemberg, Stützpunkt Tübingen, Derendinger Str. 49.

23. 2. 1960, 17.30, Fa. Escher-Wyss, Ravensburg, Vortragssaal: „Kompensationen der Zählwerkreibung in Elektrizitätszählern durch Rüttelkräfte“, Dipl.-Ing. G. Claus, Hameln.

Regensburg: VDE-Bezirksverein Nordbayern, Stützpunkt Regensburg, Einhauserstr. 9.

23. 2. 1960, 20.00, „Weidenhof“, Maximilianstr.: Mitgliederversammlung.

Stuttgart: ETV Württemberg, Stuttgart, Lautenschlagerstr. 21.

18. 2. 1960, 17.30, Techn. Hochschule, Elektrotechn. Inst., Breitscheidstr. 3: „Rundsteuertechnik mit tiefen Steuerfrequenzen“, Dipl.-Ing. H. Knop, Frankfurt a. M.

Essen: Haus der Technik, Essen, Hollestr. 1.

16. 2. 1960, 17.00, Haus der Technik: „Verfahrenstechnik der Wasseraufbereitung“, Dr. Wesly, Ludwigshafen.

23. 2. 1960, 14.30, Haus der Technik: „Neue Verfahren der Elektrizitätsgewinnung“, Dr. Reger, Bad Godesberg.

BEKANNTMACHUNGEN

Deutsches Komitee der Internationalen Hochspannungskonferenz

Frankfurt a. M., Osthafenplatz 6, Fernruf 4 31 57

CIGRE-Tagung 1960

Vom 15. bis 25. Juni 1960 findet in Paris in der Fondation Berthelot, 28 bis, rue Saint Dominique, die 18. Tagung der Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE) statt.

Allgemeine Angaben

Auf der Tagung werden alle im Zusammenhang mit der Erzeugung, Umspannung und Verteilung der elektrischen Energie, insbesondere bei Höchstspannungsnetzen auftretenden Probleme behandelt. Die Diskussionen werden sich hauptsächlich auf folgende Gebiete beziehen: Generatoren, Transformatoren, Leistungsschalter, Höchstspannungskabel, Freileitungen einschließlich der Maste und Gründungen sowie der Isolatoren, Betrieb und Zusammenschluß der Netze, Schutzrelais, Leistungs- und Frequenzregelung, Stabilität, Überspannungen und Blitz. Eine besondere Bedeutung wird die Aussprache über das Gebiet der Energieübertragung mit Höchstspannungen bis 600 kV sowie über die Höchstspannungs-Gleichstrom-Übertragung haben. Wie bei früheren Tagungen werden auch dieses Mal hervorragende Fachleute aus etwa 50 Ländern teilnehmen.

Die auf der Tagung zur Erörterung stehenden Fragen über die obengenannten Gebiete werden in 130 Fachberichten vorgelegt, zu deren Verfasser die namhaftesten Experten der einzelnen Länder gehören. Die Fachberichte werden nicht einzeln vorgetragen, son-

dern in Gruppen zusammengefaßt. Auszüge aus ihnen werden von einem Gruppenberichtersteller vorgetragen, woran sich eine allgemeine Diskussion anschließt. Die Diskussionsredner bedienen sich entweder der französischen oder der englischen Sprache, wobei gleichzeitig über eine Simultan-Anlage eine Dolmetschung von der einen in die andere Sprache durchgeführt wird. Außerdem ist, wie bereits bei der CIGRE-Tagung 1958, eine gleichzeitige Dolmetschung der französischen und englischen Diskussionsbeiträge in die deutsche Sprache vorgesehen.

Bedingungen für die Teilnahme

Die Einschreibgebühr für die Teilnahme beträgt:

- | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| 1. für Nichtmitglieder | 300 NF = 256,— DM, |
| 2. für persönliche und korporative Mitglieder, welche die Mitgliedschaft vor 1960 erworben haben, | 240 NF = 205,— DM, |
| 3. für Begleitpersonen (Damen), die nicht an den Fachsitzungen teilnehmen, | 60 NF = 51,— DM. |

Die angegebenen Beträge verstehen sich je Tagungsteilnehmer.

Für die Beitragsgebühr wird geboten: je ein Exemplar aller gedruckten Fachberichte nach Wahl in englischer oder französischer Sprache sowie sämtlicher sich auf die Tagung beziehender Schriftstücke, Teilnahme an den Fachsitzungen und Diskussionen, technischen Besichtigungen und sonstigen Veranstaltungen.

Einzelheiten über die Anmeldung können dem von der Konferenzleitung herausgegebenen Bulletin Nr. 1 entnommen werden, das Interessenten durch das Deutsche Komitee der CIGRE kostenlos zur Verfügung gestellt wird. Anmeldungen für die Tagung sind spätestens bis zum 15. März 1960 an das Deutsche Komitee der CIGRE, Frankfurt a. M., Osthafenplatz 6, zu richten. Die Tagungsgebühr kann in deutscher Währung unter dem Kennwort „CIGRE-Tagung 1960“ auf die Konten des VDE, nämlich Postscheckkonto Frankfurt a. M. 388 68 oder Konto Nr. 235 525 bei der Deutschen Bank, Frankfurt a. M., eingezahlt werden.

Wer sich an der Diskussion zu beteiligen wünscht, wird gebeten, dies dem Deutschen Komitee der CIGRE bis zum 1. Mai 1960 mitzuteilen. Das Deutsche Komitee legt Wert darauf, daß die Diskussionsbeiträge sorgfältig vorbereitet sind und etwa vorzuführende Lichtbilder oder Diapositive genau den hierfür geltenden Normen DIN 108 entsprechen, wobei besonders auf ausreichende Schriftgröße zu achten ist. Die Redezeit ist für jeden Diskussionsbeitrag auf höchstens 6 Minuten begrenzt.

Deutsches Komitee der CIGRE

Der Vorsitzende
Kneller

Der Schriftführer
Jacottet

PERSÖNLICHES

H. Kafka †. — Am 16. Dezember 1959 starb im Alter von 73 Jahren Professor emer. Dr.-Ing. *Heinrich Kafka*, Karlsruhe. *Kafka* hat nach seinem Studium an der Deutschen Technischen Hochschule in Brünn die Abschlußprüfung im Maschinenbau und in der Elektrotechnik in den Jahren 1907 und 1908 mit Auszeichnung abgelegt. Er war danach zehn Jahre als Elektroingenieur in der österreichischen Kriegsmarine tätig, zuletzt als Referent für die elektrotechnischen Angelegenheiten der Kriegsflotte. 1918 promovierte *Kafka* in Brünn mit Auszeichnung zum Doktor-Ingenieur und habilitierte sich dort als Privatdozent für Elektrotechnik. Schon damals zeigte er sich als hervorragender akademischer Lehrer; als er aus verwaltungstechnischen Gründen seine Lehrtätigkeit aufgeben mußte, kam es zu Protesten von seiten seiner Studenten.

Im Jahre 1920 ging *Kafka* als Projektierungs- und Versuchsingenieur in die elektrotechnische Industrie; im Jahre 1928 wurde er Direktor einer Porzellanfabrik, die Hochspannungsisolatoren entwickelte und herstellte. Seit 1925 war er außerdem wieder als akademischer Lehrer an der Deutschen Technischen Hochschule in Prag tätig. 1941 wurde er dort zum außerordentlichen Professor, 1942 zum Direktor des Institutes für Hochfrequenztechnik, 1943 zum ordentlichen Professor ernannt.

Als mit dem Ende des zweiten Weltkrieges die Deutsche Technische Hochschule in Prag geschlossen wurde, nahm *Kafka* eine Einladung für eine industrielle Forschungstätigkeit nach Zagreb an. Im Jahr 1951 erreichte ihn der Ruf der Technischen Hochschule Karlsruhe, das Fachgebiet Hochfrequenztechnik in Lehre und Unterricht wahrzunehmen. Am 1. März 1952 nahm *Kafka* diese Tätigkeit auf. Nach seiner Emeritierung im Jahre 1957 hat er weiterhin aktiv am akademischen Unterricht durch Sondervorlesungen über Gebiete mitgewirkt, auf denen er ein allgemein anerkannter Fachmann ge-

worden war. Von seiner wissenschaftlichen Tätigkeit zeugen 50 Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Zeitschriften und zwei Buchveröffentlichungen.

J. Fischer

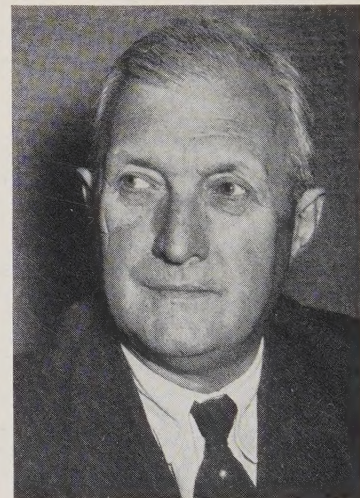
L. Lebrecht. — Am 11. Januar 1960 beging Prof. Dr.-Ing. *Ludwig Lebrecht* seinen 65. Geburtstag. Die Fachwelt verehrt in *Ludwig Lebrecht* einen hervorragenden Ingenieur, Forscher und Hochschullehrer und einen lebenswerten Menschen, den an dieser Stelle würdigen zu dürfen, dem Schreiber dieser Zeilen eine besondere Ehre war.

Ludwig Lebrecht wurde am 11. Januar 1895 in Frankfurt a. M. geboren und besuchte zunächst das humanistische Gymnasium in Neustadt a. d. Haardt. Nach Heimkehr aus dem ersten Weltkrieg bezog er im Jahre 1919 die TH Darmstadt, wo er seinen Studien der Starkstromtechnik einen ersten Abschluß gab, als er im Mai 1922 die Diplomprüfung mit Auszeichnung bestand. Als Hauptassistent am Lehrstuhl „Elektromaschinenbau“ von Professor *Punga* promovierte *Lebrecht* am 8. Januar 1926 mit sehr gut und folgte dann seiner Neigung zum Lehrfach, indem er als Dozent zum Hindenburg-Polytechnikum nach Oldenburg ging, an dem er bis zum Herbst 1928 wirkte. Es war gut, daß *Lebrecht* dann doch die Bedeutung einer praktischen Tätigkeit erkannte; am 1. September 1928 trat er bei der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in die Abteilung für Zentralstationen ein. Hier fand er ein reichhaltiges Arbeitsprogramm vor, das dann auch seinen weiteren Entwicklungsgang prägte und aus dem folgendes Stichwortverzeichnis genügen möge: Umformer für die öffentliche Stromversorgung im In- und Ausland (Motor-Generatoren, Einankerumformer, Periodenumformer, Netzkupplungsumformer und Phasenschieber), im späteren Verlauf der Entwicklung auch Quecksilberdampf-Gleichrichter des Eisen- und Glasytys. Ab 1933 erweiterte sich sein Arbeitsgebiet durch Planung und Bau von Stromrichteranlagen für die Industrie (Gleichrichteranlagen für Aluminium-, Magnesium-, Wasserstoff-, Chlorkali-Elektrolysen usw.), wozu noch ab 1936 die Stromrichtertechnik der Spezialantriebe der Elektroöfen, der Umkehrstraßen, der Breitbandstraßen usw. trat. *Lebrechts* Aufgabenkreis wurde noch, um das Maß vollzumachen, 1940 durch die Hinzunahme der damals gerade aufgekommenen Kontaktumformer und der Stromversorgungsanlagen für Sender- und Verstärkerämter abgerundet.

Man würde der Leistung *Lebrechts* nicht gerecht werden, wenn man unerwähnt ließe, daß es ihm trotz der Vielzahl der auf ihn einströmenden Probleme gelang, der Stromrichtertechnik wesentliche Impulse zu geben und so ihr seinen Stempel aufzudrücken. Die von ihm aufgestellten und später allgemein befolgten Grundsätze führten zur Verbesserung des Wirkungsgrades, zur Vereinfachung der ganzen Anlage, zur Verringerung der Oberwellen und damit der Rückwirkung der Stromrichter auf das speisende Netz und — last not least — zur Verringerung der Stromrichteranlagen. Die AEG dankte dies *Lebrecht* durch in steiler Kurve verlaufende Beförderungen: 1933 zum Abteilungsleiter, 1934 zum Prokuristen, 1937 zum Abteilungsleiter und 1945 zum stellvertretenden Leiter der Abteilung Industrie. Daß *Lebrecht* während seiner AEG-Tätigkeit auch noch Zeit zu ausgedehnter literarischer und Vortrags-Tätigkeit sowie zu ehrenamtlicher Mitarbeit in verschiedenen VDE-Kommissionen fand, sei nur am Rande vermerkt.

Im April 1945 geriet *Lebrecht* als Zivilist in russische Gefangenschaft, nach seiner Rückkehr im August 1945 wurde er wieder in seine alten Funktionen eingesetzt. Seine letzte Station innerhalb der AEG erhielt *Lebrecht* im März 1947, als ihm die technische Leitung des AEG-Büros Hannover übertragen wurde.

Dort erreichte ihn Ende August 1947 die Berufung als ordentlicher Professor auf den Lehrstuhl für elektrische Anlagen und Netze der TH Darmstadt sowie als Direktor des dortigen Institutes „Elektrische Anlagen und Netze“. Als *Lebrecht* 1948 den Lehrstuhl übernahm, waren die damaligen Institute noch leer, nicht einmal ein Assistent war an seinem Lehrstuhl vorhanden. Unter seinem Dekanat entstand dann der Neubau des elektrotechnischen Institutes als geschlossenes Ganzes auf einem eigenen Gebäudekomplex. Über die Tätigkeit *Lebrechts* als Hochschullehrer wäre noch zu



sagen, daß er nicht nur als Lehrer hochgeschätzt wird, sondern auch als väterlicher Freund der Assistenten und Studenten bis zu den Institutsgehilfen bekannt ist.

Im Jahre 1952 wurde *Lebrecht* vom Vorstand des Verbandes Deutscher Elektrotechniker als Vorsitzender des neu gegründeten Wissenschaftlichen Ausschusses, einer der Hauptausschüsse des VDE, berufen. Er hat sich trotz der in Darmstadt seiner harrenden Arbeitslast diesem Rufe nicht versagt und den Wissenschaftlichen Ausschuß aufgebaut und 5 Jahre lang vorbildlich geleitet, bis ihn der fortschreitende Neubau seines Institutes zur Niederlegung seines Ehrenamtes zwang.

So wünschen wir denn unserem Geburtstagskind noch viele Jahre der Gesundheit und ungebrochenen Arbeitskraft zu seinem und seiner Familie Wohl und zum Nutzen der deutschen Elektrotechnik.

J. Biermanns

A. Stormanns. — Am 3. Februar 1960 hat Professor Dipl.-Ing. *Albert Stormanns* seinen 65. Geburtstag gefeiert.

Nach Abschluß seines Studiums an der TH Karlsruhe im Jahre 1922 war *Stormanns* zunächst bei der Deutsch-Luxemburgischen Bergwerks- und Hütten-AG in Bochum tätig. Hier erschloß sich ihm ein großes Tätigkeitsgebiet: Projektierung und Errichtung neuer Anlagen und die technische Bearbeitung der elektrischen Einrichtungen der Zechen und Kokereibetriebe; Beaufsichtigung und Instandsetzung eines großen Kabelnetzes sowie Leitung der elektrischen Montagen. Am 1. Januar 1937 trat *Stormanns* als Oberingenieur und Leiter der Elektroabteilungen in die Dienste des Vereins zur Überwachung der Kraftwirtschaft der Ruhrzechen, des späteren Technischen Überwachungs-Vereins Essen e.V. Hier ist er auch heute noch tätig. Früh schon war es ihm zur Aufgabe geworden, sein umfangreiches Wissen über die industrielle Anwendung der Elektrotechnik und die großen Erfahrungen seines Berufslebens jüngeren Ingenieuren zu übermitteln. Veröffentlichungen, Vorträge und Vorlesungen machten ihn in der Fachwelt bekannt. Eine schöne Anerkennung fand diese Aufgabe — *Stormanns* erfüllt seit dem Winter-Semester 1953/54 einen Lehrauftrag an der Technischen Universität Berlin über „Elektrotechnik im Bergbau“ — im November des vergangenen Jahres mit der Ernennung zum Honorarprofessor der TU Berlin.



Der Technische Überwachungs-Verein Essen e.V. verdankt *Stormanns* viel. Seine Kenntnisse, seine organisatorische Neigung und seine vielseitigen geistigen Interessen schufen eine kameradschaftliche Gemeinschaft von Elektro-Sachverständigen, die sich im West-

deutschen Industriegebiet einen beachtlichen Ruf erworben hat. Als Leiter des Elektrotechnischen Ausschusses der Vereinigung der Technischen Überwachungs-Vereine e.V. erweist er der elektrotechnischen Überwachung im gesamten Bundesgebiet große und wertvolle Dienste.

Für die Interessen des VDE hat *Stormanns* sich immer selbstlos eingesetzt. Er ist Vorsitzender des Technischen Ausschusses und der VDE-Kommissionen 0100 „Errichtungsvorschriften unter 1000 V“, 0118 „Errichtungsvorschriften für Bergwerksanlagen“ sowie Mitglied in verschiedenen anderen VDE-Kommissionen und Arbeitsausschüssen.

Möge sich der Wunsch erfüllen, daß *Albert Stormanns* Gesundheit und Schaffenskraft noch viele Jahre erhalten bleiben.

H. Diehl

BÜCHER

DK 621.3 : 061.2(43)/(083.133)VDE

VDE-Vorschriften. Bd. 1: Allgemeines, Starkstromanlagen. Hrsg. Verband Deutscher Elektrotechniker (VDE) e.V. 26. Aufl. Mit 685 S., zahlr. B. u. Taf., Format 15,5 cm × 21,5 cm. VDE-Verlag, Berlin 1959. Preis Ganzln. 15,— DM.

Der jetzt in der 26. Auflage vorliegende Band 1 enthält nach dem Stand vom 1. Juni 1959 die Bestimmungen der Gruppen 0 (All-

gemeines) und 1 (Starkstromanlagen) des VDE-Vorschriftenwerkes. In der Schrift findet die Tätigkeit der zuständigen Kommissionen und Stellen des VDE seit dem Erscheinen der vorhergehenden Auflage im Jahre 1956 ihren Niederschlag.

Von den Arbeiten in der Gruppe 1 sind die geänderten Fassungen von VDE 0020 und VDE 0024 erwähnenswert, die den heutigen Stand der Entwicklung und des Aufbaues des VDE sowie die Aufgabe der Prüfstelle und den Zweck des VDE-Zeichens darlegen. Außerdem ist diese Gruppe um VDE 0052 erweitert worden, die eine grundsätzliche Bekanntmachung der Vorschriftenstelle über die Regelung für den Anschluß von Geräten an das Netz enthält.

Besondere Bedeutung für weite Kreise der Elektroindustrie und des Elektrohandwerks, der Elektrizitätsversorgungs-Unternehmen und Verbraucher hat die Neubearbeitung der Bestimmungen über das Errichten von Starkstromanlagen mit Nennspannungen unter 1000 V (VDE 0100). In dieser Vorschrift sind die langjährigen Arbeiten der zuständigen VDE-Kommission enthalten. Die Vorschrift trägt zweifellos einem dringenden und häufig geäußerten Wunsch der Praxis Rechnung, die eine zeitgemäße Fassung der wichtigsten Installationsbestimmungen für die am meisten verbreiteten elektrischen Anlagen bisher vermissen mußte. Das gleiche gilt für die neu bearbeiteten Errichtungsvorschriften für Starkstromanlagen in Versammlungsstätten (VDE 0108).

Mit der Neubearbeitung oder Änderung sind die Vorschriften für die Errichtung elektrischer Anlagen in explosionsgefährdeten Betriebsstätten (VDE 0165), in explosivstoffgefährdeten Betriebsstätten (VDE 0166) sowie für schlagwetter- und explosionsgeschützte elektrische Betriebsmittel (VDE 0170 und VDE 0171) den in den letzten Jahren gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnissen angepaßt worden. Dabei hat VDE 0165 durch die Tafeln über sicherheitstechnische Kennzahlen brennbarer Gase und Dämpfe sowie brennbarer Industriestaube eine wichtige Ergänzung erfahren.

Die neu aufgenommenen Vorschriften für die Errichtung und den Betrieb von Elektrofishereianlagen in Binnengewässern (VDE 0136 Teil I) und die Vorschriften und Richtlinien für das Abspritzen von Hochspannungsanlagenteilen unter Spannung (VDE 0143) stellen eine wertvolle Ergänzung des VDE-Vorschriftenwerkes dar. Auch die neuen Richtlinien über Nennströme von 1,25 bis 6300 A (VDE 0177) und über Nennfrequenzen von 16 $\frac{2}{3}$ bis 10 000 Hz (VDE 0179) werden von den beteiligten Kreisen der Fachwelt begrüßt werden.

Die noch weiterhin in dem Buch enthaltenen Neufassungen und Änderungen von Vorschriften runden seinen Inhalt ab und gleichen ihn dem jetzigen Stand der Technik an. Aufmachung und Ausstattung des Bandes entsprechen dem für das VDE-Vorschriftenwerk Üblichen.

H. Kropf

DK 621.3.018.42.029.64

Untersuchungen über Frequenzstabilisation im Mikrowellengebiet. Von A. Brändli. Mitt. aus dem Institut für Hochfrequenztechnik an der ETH Zürich Nr. 25. Hrsg. F. Tank. Mit 51 S., 37 B., Format 15,5 cm × 23 cm. Verlag Leemann, Zürich 1959. Preis geb. 5,— sfr.

Die als Promotionsarbeit eingereichte für jeden im Mikrowellengebiet tätigen Ingenieur sehr interessante Veröffentlichung ist in der von Prof. Dr. Tank herausgegebenen Reihe der „Mitteilungen aus dem Institut für Hochfrequenztechnik der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich“ erschienen.

Nach kurzer Betrachtung der bekannten mit einer Bezugsfrequenz arbeitenden Verfahren wird zur Frequenzstabilisierung eine als „gleicharmiger Diskriminator“ bezeichnete Schaltung angegeben, die im Mikrowellenteil aus einem „Magic-T“ besteht, an das zwei Dioden angeschlossen sind. Das Eingangssignal gelangt zu gleichen Teilen zu einem Resonator, der die halbe Energie in einen Mischkristall reflektiert, und zu einem mit 30 MHz gespeisten Modulator, dessen Seitenbänder nach einer Dämpfung um 3 dB ebenfalls zum Mischkristall gelangen. Hier entsteht aus dem Träger und den Seitenbändern die Differenzfrequenz, die verstärkt und in der Phase mit dem modulierenden Oszillator verglichen wird. Durchläuft die Frequenz des Eingangssignals die Eigenfrequenz des Resonators, so ändert sich dessen Reflexionskoeffizient nach Amplitude und Phase, und am Ausgang verläuft die Spannung in der Form einer Diskriminatorcharakteristik, die zur Stabilisierung des Mikrowellen-Oszillators benutzt werden kann.

Der Aufbau des veränderlichen Hohlraumresonators sowie eines besonderen Steghohlleiter-Detektors und -Modulators mit einer Bandbreite von 8,2 bis 12,4 GHz im X-Band wird ausführlich beschrieben. Mit einer einzigen Einstellung läßt sich der Diskriminator auf eine vorgeschriebene Frequenz bringen. Der bei der Stabilisation eines Reflexklystrons bei einer Leistungsaufnahme von 1 mW erreichbare Stabilisationsfaktor 10 000 ist infolge des Rauschens nur bis etwa 4000 sinnvoll verwendbar; die kurzzeitige mögliche Stabilität liegt in der Größenordnung von 10⁻⁸.

H. Fricke

DK 621.355.2(023.12

Der Bleiakкумуляtor. Praxis und Theorie. 8. Aufl. Von W. Garten. Mit 96 S., 57 B., zahlr. Taf., Format 15 cm × 21 cm. Verlag R. Oldenbourg GmbH, München 1958. Preis kart. 5,80 DM.

Dieses Buch über den Blei-Akkumulator kann als wertvolle Ergänzung der Bedienungsanweisungen für Akkumulatoren-Batterien gelten. Der interessierte Leser findet darin von berufener Seite

eine klare Darstellung der elektrochemischen Vorgänge bei der Ladung und Entladung. Der Verfasser hat sich große Mühe gegeben, die dem Nichtchemiker bzw. -physiker etwas fremde Materie näherzubringen, und läßt es auch nicht an Hinweisen fehlen, welche Folgerungen aus diesen Erkenntnissen für die Praxis gezogen werden können.

Das Buch gliedert sich in einen theoretischen und praktischen Teil. Ersterem liegt die „Doppelsulfat-Theorie“ zugrunde, die heute allgemein anerkannt wird, soweit es sich um Entladungen und Ladungen mit niederen Stromstärken handelt. Nach Ansicht des Referenten hätte bei den Ausführungen über die Diffusion, worunter der Verfasser den Ausgleich der Säure im Inneren der Platten mit der übrigen Zellsäure versteht, auch auf die Bedeutung der Gasentwicklung bei der Ladung hingewiesen werden sollen. Bei der Langsamkeit der Diffusionsvorgänge wird gerade durch sie eine rasche Mischung der Säure wieder erreicht. Die Gasentwicklung am Ende der Ladung ersetzt gewissermaßen ein mechanisches Rührwerk.

Im Anhang werden dann noch wertvolle Hinweise gegeben, wie man mit Hilfe von „Hilfselektroden“ getrennt das Verhalten der positiven und negativen Platten bei Ladung und Entladung messen kann. Das Buch schließt mit einer wohl hier zum ersten Male angewendeten Darstellung der Vorgänge im Blei-Akkumulator vom Standpunkt der modernen Atomtheorie. Es ist allen interessierten Kreisen nur wärmstens zu empfehlen.

F. Fegert

DK 621.315.616.9(047.3)

Kunststoff-Taschenbuch. Von H. Saechtling und W. Zebrowski. 14. völlig überarb. u. erw. Ausg. Mit 487 S., 52 B., zahlr. Taf., Format 11,5 cm × 17,5 cm. Verlag Carl Hauser, München 1959. Preis Kunstleder 16,— DM.

Der von Auflage zu Auflage zunehmende Umfang des Buches zeigt die rasche Entwicklung auf dem Gebiete der Kunststoffe. Für den Elektrotechniker, der mit Kunststoffen zu tun hat, ist es bereits zu einem Begriff geworden. Es bringt in handlicher Form Typentafeln, Tafeln zur Bestimmung der Kunststoffart, die Bekanntmachungen für die Überwachung von Preßteilen, die — bei vorhandenem Überwachungszeichen — Typ und Lieferer eines Preßteiles erkennen lassen, und bringt ein wiederum ausgeweitetes Verzeichnis von Handelsnamen. Der Konstrukteur findet aber auch eine ausführliche Einführung in die Verarbeitungsarten, in die Herstellung von Kunststoffserzeugnissen und ihre Chemie. Richtwerttafeln, die bisweilen auf noch ausführlichere in Schrifttum verweisen, sind eine wertvolle Hilfe für den Ingenieur. Bei den Schichtpreßholzern ist der in den westeuropäischen Ländern erreichte Entwicklungsstand nicht hinreichend berücksichtigt.

K. Potthoff

DK 621.316.5.062.001.2(021.5)(023)=2

Logical design of electrical circuits. Von R. A. Higonnet und R. A. Grea. Mit 220 S., zahlr. B. u. Taf., Format 16 cm × 24 cm. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, Toronto, London 1958. Preis Ganzln. 77,6 sh.

Beim Entwurf von Schaltkreisen und Schaltwerken für Rechenautomaten, automatische Vermittlungseinrichtungen und andere automatische Systeme bedient man sich zweckmäßig der Berechnungsmethoden der Booleschen Algebra.

Das Buch gibt zuerst eine Einführung in dieses Gebiet. Man findet eine vollständige Behandlung der Booleschen Methoden für die Darstellung und den Entwurf von Schaltkreisen. Neben den algebraischen Methoden werden auch die anschaulichen geometrischen Verfahren zur Darstellung der Verknüpfungseigenschaften logischer Schaltungen behandelt. Dann werden erprobte Verfahren zur Vereinfachung von Schaltkreisen und eine einfache Methode zur Behandlung von Schaltwerken gebracht. Alle diese Verfahren werden an Relaischaltungen erläutert. Ein eigener Abschnitt befaßt sich jedoch auch mit Dioden- und Röhrenschaltungen. Im Anhang ist dem Buch eine wertvolle Tabelle von E. F. Moore über Netzwerke mit bis zu vier Relais beigegeben.

Das Buch setzt nur die elementaren Begriffe der Mathematik und der Elektrotechnik voraus. Es ist leicht verständlich geschrieben. Sowohl zur Einführung in das Gebiet der Schaltalgebra, wie auch als Werkzeug für den Entwurf von Schaltkreisen ist es sehr geeignet.

E. E. Pollmeier

Abschluß des Heftes: 5. Februar 1960

Schriftleitung: Frankfurt a. M., Osthafenplatz 6; Fernruf 4 31 57; Fernschreiber (Telex) 04—12 871.

Hauptschriftleiter: Dr.-Ing. P. Jacottet (für den redaktionellen Teil verantwortlich).

Schriftleiter: Dipl.-Ing. H. Lübbars, Dipl.-Ing. F. Meske und Dipl.-Ing. K. Rangs.

Zuschriften für die Schriftleitung nicht an eine persönliche Anschrift, sondern nur an: Schriftleitung der ETZ, Frankfurt a. M., Osthafenplatz 6.

BUCHEINGÄNGE

(Ausführliche Besprechung vorbehalten.)

Schriftenreihe Steine und Erden. Bd. 4: Zehn Jahre Niedersächsisches Materialprüfamt. Von A. Matting. Mit 215 S., zahlr. B. u. Taf., Format 15 cm × 21,5 cm. Hermann Hübener Verlag, Goslar 1959. Preis kart. 24,— DM.

Richtlinien für elektrische Anlagen in explosivstoffgefährdeten Betriebsstätten. Richtl. Nr. 17 d. Berufsgenossenschaft d. chemischen Industrie. Mit 16 S., Format 15 cm × 21,5 cm. Verlag Chemie GmbH, Weinheim/Bergstr. 1959. Preis brosch. 1,— DM.

Electron physics. The physics of the free electron. Von O. Klemperer. Mit 259 S., zahlr. B. u. Taf., Format 14 cm × 22,5 cm. Butterworths Scientific Publications, London 1959. Preis Ganzln. 7,00 \$.

The electric arc. Methuen's monographs on physical subjects. Von J. M. Somerville. Mit 159 S., 38 B., 2 Taf., Format 11 cm × 17 cm. Verlag Methuen & Co. Ltd., London, u. John Wiley & Sons Inc., New York 1959. Preis Ganzln. 12,6 sh.

Digital and sampled-data control systems. McGraw-Hill electrical and electronic series. Von J. T. Tou. Mit 644 S., zahlr. B., 1 Taf., Format 16 cm × 24 cm. McGraw-Hill Book Company Inc., New York, Toronto, London 1959. Preis Ganzln. 5 £ 16,6 sh.

Technische Kunstgriffe bei physikalischen Untersuchungen. 12. völlig neubearb. Aufl. Von E. Angerer. Mit 470 S., 172 B., Format 12,5 cm × 19 cm. Hrsg. H. Ebert. Verlag Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig 1959. Preis Ganzln. 24,80 DM.

Das erfolgreiche Führen in Technik und Wirtschaft. Von W. Schmidt. Mit 334 S., 7 B., Format 14,5 cm × 21,5 cm. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1959. Preis Ganzln. 23,80 DM.

Stabilität des elektrischen Verbundbetriebs. Von A. Kaminski. Mit 472 S., zahlr. B. u. Taf., Format 17 cm × 24,5 cm. VEB-Verlag Technik, Berlin 1959. Preis Lederin 39,20 DM.

Die Verwendung der Atomenergie für industrielle Zwecke. Von F. Perrin. H. 67 a der Arbeitsgemeinschaft für Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen. Mit 39 S., 22 B., Format 16,5 × 24 cm. Hrsg. L. Brandt. Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen 1958. Preis kart. 3,90 DM.

Bildliche Darstellung der Verteilung und der Bewegung von radioaktiven Substanzen im Raum, insbesondere in biologischen Objekten (Physikalischer Teil). Von W. Fucks u. G. Schumacher u. A. Scheidweiler. **Bildgebung von Radioisotopenelementen im Raum bei bewegten Objekten (Herz, Lungen etc.) (Medizinischer Teil).** Von H. W. Knipping u. E. Liese. H. 66 der Arbeitsgemeinschaft für Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen. Mit 94 S., zahlr. B., Format 16,5 cm × 24 cm. Hrsg. L. Brandt. Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen 1958. Preis kart. 8,20 DM.

DISSERTATIONEN

Theorie und Anwendung der Entladung des symmetrischen homogenen LC-Kettenleiters zur Erzeugung hochgespannter Rechteckimpulse. Von W. Böning. TH Aachen 1959.

Über die Trocknung von Hochspannungskabeln im Fein- und Hochvakuum. Von G. Wanser. TH Braunschweig 1957.

Über das Verhalten eines Asynchronmotors bei verschiedenen Läufern aus massivem Stahl. Von H. Peesel. TH Braunschweig 1958.

Über den Einfluß der Schallfeldinterferenzen aus den Fehlernachweis in Festkörpern. Von F. Linhardt. TH Braunschweig 1958.

Über die Verwendung von Sprengstoffen in der Schaltertechnik und die dabei erreichbaren Schaltzeiten. Von W. Koch. TH Braunschweig 1958.

Lösung der Diffusionsgleichung einer rotationssymmetrischen Halbleiterdiode unter Berücksichtigung von Raum- und Oberflächenkombination mit Hilfe eines Analogienetzwerkes. Von A. Fref. ETH Zürich 1958.

Angenäherte Getriebe-Synthese durch harmonische Analyse der vorgegebenen periodischen Bewegungsverhältnisse. Von H. Rankers. TH Aachen 1958.

Drehstrom-Gleichstrom-Steuersatz mit Trockengleichrichter in Einwellen- und Zweiwellen-Anordnung. Von H. Jansen. TH Aachen 1959.

Folgende Aufsätze erschienen in der ETZ Ausgabe B vom 8. Februar 1960:

Heft 3

H. Jensen: Impulsbetrieb bei Lampen für Kinoprojektion.

H. Franken: Die Messung von Kontaktprellungen bei Schaltgeräten.

G. Irresberger: Gefahren beim Fesselflügsport in Leitungsnähe.

G. Mende: Über Kaltkathodenröhren und ihre Anwendungen.

E. Koch: Wirtschaftsaussicht 1960: Vollbeschäftigung mit Überhitzungsgefahren.

Schluß des Textteiles

Verlag und Anzeigenverwaltung: VDE-Verlag GmbH, Berlin-Charlottenburg 2, Bismarckstraße 33, Fernruf 34 01 41, Fernschreiber (Telex) 01—84 083.

Anzeigenleitung: Kurt Totzauer.

Bezugspreis (halbjährlich zuzügl. Zustellgebühr) 22,— DM

für VDE-Mitglieder - nur durch den VDE-Verlag - 14,— DM;

Ausgabe A und B zusammen 30,— DM,

für VDE-Mitglieder - nur durch den VDE-Verlag - 21,— DM.

Einzelpreis dieses Heftes 2,— DM.

Druck: Deutsche Zentraldruckerei, Berlin SW 61, Dessauer Straße 6/7.